



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Eduardo Vieira Torres

Ligações Estruturais de Madeira Segundo o
Novo Eurocódigo 5

maio de 2021



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Eduardo Vieira Torres

Ligações Estruturais de Madeira Segundo o Novo Eurocódigo 5

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Manuel Branco

maio de 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, devo expressar os meus especiais agradecimentos a todas as pessoas que tornaram possível a realização desta dissertação

Ao Professor Jorge Branco, o meu orientador, quero expressar o meu profundo agradecimento, pelo interesse, os conhecimentos partilhados e pela orientação e disponibilidade, que sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Carlos Loureiro pela sua ajuda e disponibilidade na partilha de conhecimentos ao nível de trabalhos escritos.

Quero agradecer também a todos os meus amigos que me acompanharam durante a realização deste trabalho, pela vossa disponibilidade, interesse e ajuda prestados ao longo da realização deste trabalho.

Por fim, os mais importantes, a minha família, sobretudo aos meus pais (Jorge e Maria), à minha irmã Susana e ao meu cunhado Pedro, que acompanharam de perto o desenvolvimento deste trabalho e que me ajudaram nos bons e maus momentos, pela vossa disponibilidade e compreensão, que foram essenciais para a conclusão desta dissertação.

“Todas as vitórias ocultam uma ambição”

Simone de Beauvoir

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Ligações estruturais de madeira segundo o novo Eurocódigo 5

RESUMO

As estruturas de madeira encontram-se na base da construção civil, acompanhando o seu desenvolvimento ao longo dos tempos. No entanto, a evolução do sector conduziu à introdução de novos materiais, como o betão armado e o aço, que levou à perda de relevância da madeira no sector da construção. Contudo, a evolução tecnológica, quer ao nível de ferramentas, quer ao nível dos materiais (derivados), o aperfeiçoamento dos conhecimentos e o desenvolvimento de normalização para o dimensionamento de estruturas de madeira, vieram demonstrar as potencialidades da madeira enquanto material de estruturas, com o benefício que promove uma construção sustentável, por ser um material natural, renovável e reciclável.

A procura de conhecimentos relativos às construções de madeira tornou-se um tópico de pesquisa para vários autores, já que, o Eurocódigo 5, proposto pelo CEN em 2004, não foi capaz de acompanhar os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos. Neste momento, este regulamento normativo encontra-se em revisão com a finalidade de introduzir os novos derivados de madeira, em particular, MLCC, LVL, etc., e permitir a análise de elementos, sistemas e ligações através das mais recentes metodologias de análise.

Nas estruturas de madeira, os pontos de maior fragilidade são as ligações. Atualmente, existem inúmeras formas de se realizar as ligações dos vários elementos de madeira, contudo, esta dissertação foca em particular as ligações do tipo cavilha. Para além da análise aos modelos e expressões de cálculo das ligações tipo cavilha para estruturas de madeira sugeridas pelos documentos que se conhecem relativamente à nova geração do Eurocódigo 5, apresenta-se uma comparação com a versão atual deste regulamento, datada de 2004. Sempre que possível, discute-se as alterações, a introdução de novos parâmetros e os valores recomendados, com o objetivo de facilitar a introdução deste novo documento na sociedade técnica Portuguesa.

Palavras-chave: Estruturas de madeira; Ligações; Eurocódigo 5; Nova geração; Cálculo.

Timber structural connections according to the new Eurocode 5

ABSTRACT

The timber was the first material used by Human to build their dwell and has been always active in the mankind evolution. However, the evolution the construction sector introduced new materials, like concrete and steel, that have contributed to the decrease of timber importance as building material. In last decades, the development of new design rules, technological evolutions both on equipment and wood-based products, and a better knowledge at the material level, have recall the interest on the use of timber in construction. Moreover, timber is a natural, renewable resource that promote a sustainable construction, aligned with the current concerns of the society.

The current version of Eurocode 5, launch by CEN in 2004, does not represent the current state-of-the-art on the timber engineering. Several material and technological progresses are missing.

Connections are the key point in the timber structures. Several ways exists to do a connection between timber elements. However, the most common, and therefore the most important, are the so called dowel-type joints with metal fasteners.

This work aims to analyse current working documents about the new generation of Eurocode 5, in particular, focusing the chapter related with dowel-type joints. The new design methodologies and formulas are presented and discussed and, when possible, the results of applying both versions of the code, are compared and discussed. It is expected that this work helps the Portuguese technical society to accept this new version of Eurocode 5.

Keywords: Timber structures; connections; Eurocode 5; new generation; calculation.

Índice

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xix
1. Introdução	21
1.1 Enquadramento	21
1.2 Objetivos e metodologia	22
1.3 Organização da dissertação	23
2. A madeira na construção	25
2.1 Enquadramento histórico	25
2.2 A madeira, como material.....	26
2.3 Propriedades físicas da madeira.....	29
2.3.1 Humidade ou teor em água.....	29
2.3.2 Retração	30
2.3.3 Massa volúmica	31
2.3.4 Durabilidade	31
2.3.5 Resistência ao fogo.....	33
2.4 Propriedades mecânicas da madeira.....	34
2.4.1 Resistência à compressão paralela ou perpendicular às fibras.....	34
2.4.2 Resistência à tração paralela ou perpendicular às fibras.....	35
2.4.3 Resistência ao corte.....	35
2.4.4 Flexão	36
2.4.5 Elasticidade.....	36
2.4.6 Fluência	37
2.5 Madeira e os vários derivados da madeira	37
2.5.1 Madeira maciça	37

2.5.2	Madeira lamelada colada (MLC).....	38
2.5.3	Madeira lamelada colada cruzada (MLCC).....	39
2.5.4	Madeira micro lamelada colada (LVL).....	40
2.5.5	Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB).....	40
2.5.6	Aglomerado de partículas	41
2.5.7	Aglomerado de fibras de madeira (MDF).....	42
3.	Ligações dos elementos de madeira.....	45
3.1	Tipos de ligações	45
3.1.1	Ligações Tradicionais.....	46
3.1.2	Ligações Coladas.....	47
3.1.2.1	Varões Colados	48
3.1.3	Ligações com elementos metálicos.....	49
3.2	Regulamentação aplicável e Eurocódigo 5	51
3.2.1	Regulamentação para as ligações do tipo cavilha.....	53
4.	O novo Eurocódigo 5.....	57
4.1	Rigidez de uma ligação	57
4.2	Tipo Cavilha.....	58
4.2.1	Resistência lateral de uma ligação por ligador e por plano de corte	59
4.2.1.1	Contribuição do efeito cavilha para uma ligação	59
4.2.1.2	Valor característico da resistência ao do esmagamento localizado.....	63
4.2.1.3	Valor característico do momento de cedência plástica	69
4.2.1.4	Contribuição do efeito de corda do ligador	73
4.2.2	Resistência axial de um ligador	74
4.2.3	Dimensionamento da ligação.....	79
4.2.3.1	Ligadores solicitados por uma carga axial e lateral.....	80
4.2.3.2	Espaçamentos mínimos	81
4.2.4	Modos de rotura frágil para um grupo de ligadores paralelos ao fio	84
4.2.4.1	Rotura em fila dos ligadores	85
4.2.4.2	Rotura em bloco	86

4.2.4.3	Espessura efetiva	89
4.2.5	Modo de rotura frágil para um grupo de ligadores perpendicular ao fio	91
4.3	Cavilhas de madeira	94
4.4	Dimensionamento de ligadores planos	96
4.5	Tubo de aço com reforço DVW	97
4.5.1	Especificações do tubo de aço	97
4.5.2	Especificações para o reforço DVW.....	99
4.6	Varões colados	100
4.6.1	Requisitos dos materiais.....	101
4.6.2	Resistência axial dos varões colados.....	102
4.6.3	Resistência do elemento de madeira	104
4.6.4	Resistência lateral dos varões colados	105
4.6.5	Dimensionamento da ligação.....	106
4.7	Ligações tradicionais.....	108
4.7.1	Entalhes	109
4.7.1.1	Especificações técnicas.....	109
4.7.1.2	Dimensionamento da força axial.....	110
4.7.1.3	Dimensionamento da força de corte	112
5.	Dimensionamento de uma ligação do tipo cavilha.....	115
5.1	Dimensionamento de uma ligação de acordo com o Eurocódigo 5.....	115
5.2	Dimensionamento de uma ligação de acordo com o novo Eurocódigo 5.....	121
5.3	Comparação dos resultados.....	128
6.	Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros	131
6.1	Conclusões gerais.....	131
6.2	Desenvolvimentos futuros	133
7.	Referências bibliográficas.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS**Letras maiúsculas latinas:**

A_B	Área da ligação;
A_{ef}	Área efetiva da madeira;
A_{head}	Área da cabeça do ligador, anilha ou placa de aço;
A_s	Área da tensão nominal para cavilhas roscadas e a área da secção transversal para cavilhas nervuradas;
$E_{0,mean}$	Módulo de elasticidade da madeira;
$F_{ax,b,d}$	Valor de cálculo da resistência da linha do adesivo;
$F_{ax,b,k}$	Valor característico da resistência de linha do adesivo;
$F_{ax,d}$	Valor de cálculo da resistência lateral de um ligador;
$F_{ax,Ed}$	Valores de cálculo do esforço axial;
$F_{ax,Rd}$	Valores de cálculo da capacidade resistente da ligação solicitada por um esforço axial;
$F_{bo,d}$	Valor de cálculo da resistência do modo de rotura dos membros exteriores;
$F_{bi,d}$	Valor de cálculo da resistência do modo de rotura dos membros interiores;
$F_{bs,d}$	Valor de cálculo do modo de rotura em bloco de um grupo de ligadores;
$F_{car,Ed}$	Força de compressão da perna;
$F_{car,Rd}$	Valor de cálculo da força resistente do entalhe, na ligação simples;
$F_{car1,Rd}$	Valor de cálculo da força resistente do entalhe frontal, na ligação dupla;
$F_{car2,Rd}$	Valor de cálculo da força resistente do entalhe interior, na ligação dupla;
$F_{D,d}$	Valor de cálculo da contribuição do efeito cavilha;
$F_{D,k}$	Valor característico da contribuição do efeito cavilha;
$F_{D,Rk}$	Valor característico da resistência lateral do tubo de aço;
$F_{p,k}$	Valor característico da capacidade resistente do arranque da cabeça do ligador;
$F_{ps,d}$	Valor de cálculo da resistência ao deslizamento da parte superior do elemento de madeira;
$F_{rs,d}$	Valor de cálculo do modo de rotura em fila de um grupo de ligadores;
$F_{T,d}$	Valor de cálculo do efeito de corda;

$F_{t,d}$	Valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio de madeira;
$F_{t,k}$	Valor característico da capacidade resistente à tração do ligador;
$F_{t,0,d}$	Valor de cálculo da resistência à tração da madeira;
$F_{v,b,Rd}$	Valor de cálculo da resistência ao deslizamento por plano de corte da parte superior do elemento de madeira;
$F_{v,Ed}$	Valores de cálculo do esforço lateral;
$F_{v,l,d}$	Valor de cálculo da resistência ao deslizamento por plano de corte no elemento de madeira;
$F_{v,Rd}$	Valores de cálculo da capacidade resistente da ligação solicitada por um esforço lateral;
$F_{v,Rk}$	Valor de cálculo da resistência ao corte;
$F_{w,k}$	Valor característico da capacidade resistente do arranque do ligador;
$F_{90,Rk}$	Valor característico da capacidade resistente de fendimento;
G_{mean}	Módulo de corte da madeira;
L_c	Comprimento de ligação paralelo ao fio;
$M_{dvw,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente da área do reforço;
$M_{y,Rk}$	Valor característico do momento de cedência plástica de um ligador;
$M_{90,Rk}$	Valor característico da resistência ao momento fletor da ligação;

Letras minúsculas latinas:

a_{cl}	Fator relacionado com a fixação do ligador;
a_1	Espaçamento, paralelamente ao fio, entre ligadores dispostos numa fiada;
a_2	Espaçamento, perpendicularmente ao fio, entre fiadas de ligadores;
$a_{3,t}$	Distância entre um ligador e o topo solicitado;
b	Espessura do ligador;
b_{B1}	Menor valor da largura da ligação no elemento secundário;
b_{dvw}	Comprimento da linha de cola paralela ao fio;
b_{ef}	Largura efetiva do elemento;
d	Diâmetro do ligador;
d_c	Diâmetro do núcleo do parafuso;

d_{head}	Diâmetro da cabeça do ligador;
d_0	Maior valor do diâmetro entre a pré furação ou ligador;
d_1	Diâmetro interno do ligador;
e	Distância entre a carga e o adesivo;
$f_{c,\alpha,d}$	Força de compressão para um determinado ângulo com o fio;
$f_{c,90,d}$	Força de compressão para um ângulo perpendicular;
$f_{head,k}$	Valor característico do arranque da cabeça do ligador;
$f_{h,k}$	Valor característico da resistência ao esmagamento localizado;
$f_{m,k}$	Valor característico da resistência à flexão das cavilhas de madeira;
$f_{s,k}$	Valor característico da resistência do aço;
$f_{t,0,d}$	Valor de cálculo da força de tração da madeira paralela ao fio;
$f_{u,k}$	Valor característico da resistência à tração do ligador;
$f_{v,d}$	Valor de cálculo da força de deslizamento da madeira;
$f_{v,k}$	Valor característico da força de corte;
$f_{vr,k}$	Valor característico da resistência da linha de ligação;
$f_{w,k}$	Valor característico da resistência ao arranque do ligador;
$f_{y,k}$	Valor característico da tensão de cedência do aço;
h	Altura do elemento;
h_B	Profundidade do membro secundário;
h_{B1}	Profundidade do entalhe no membro secundário;
h_{B2}	Diferença entre a profundidade do elemento secundário e a profundidade do entalhe;
h_{dvw}	Largura da linha de cola perpendicular ao fio;
h_e	Distância entre o bordo solicitado até à zona onde toda a força da conexão é transmitida, no caso parafusos autorroscante é o comprimento de penetração sem o comprimento da ponta;
$k_{c,90}$	Fator de redução;
k_d	Fator que tem em consideração a geometria do elemento;
k_{def}	Fator de deformação;
k_f	Fator que depende do tipo de ligador;
k_G	Fator de fratura;

k_{mod}	Fator de modificação da madeira;
k_{pos}	Fator que considera a posição do elemento de madeira;
k_{red}	Fator de redução que tem em consideração a distribuição desigual da força de corte, paralela ao fio, ao longo da linha da cola;
k_{ser}	Módulo de deslizamento;
$k_{ser,ax,mean}$	Módulo de deslizamento axial do ligador;
$k_{ser,v,mean}$	Módulo de deslizamento lateral do ligador;
k_t	Fator de tração;
$k_{T,1}$	Fator para o efeito de corda;
$k_{T,2}$	Fator de limitação do efeito de cavilha;
k_v	Fator que considera os diferentes materiais; Parâmetro que tem em consideração o efeito do tamanho;
l_b	Comprimento de fixação;
$l_{b,ef}$	Comprimento de fixação efetivo;
l_v	Comprimento do talão;
n	Número de ligadores ao longo do membro;
n_{col}	Número de linhas de ligadores;
n_{ef}	Número efetivo de ligadores;
n_i	Número de membros interiores;
n_o	Número de membros exteriores;
n_p	Número de camadas trespassadas;
n_{row}	Número de colunas de ligadores;
r	Raio da parte inferior do entalhe;
t	Espessura do elemento;
$t_{ef,el}$	Espessura efetiva elástica, em mm;
$t_{ef,pl}$	Espessura efetiva plástica, em mm;
t_h	Profundidade de incorporação;
t_i	Espessura dos membros interiores;
t_o	Espessura dos membros exteriores;

t_s	Espessura da anilha;
t_v	Profundidade do entalhe simples e duplo;
t_w	Comprimento de ancoragem;

Letras minúsculas gregas:

α	Ângulo entre o ligador e o fio do elemento de madeira; ângulo entre a direção do fio com a direção do fio da face do elemento; ângulo entre a direção do fio e a força;
β	Razão entre dois parâmetros; ângulo entre a direção do fio e a face escondida do elemento; ângulo entre a perna e a viga
γ	Ângulo da zona de contacto;
γ_M	Fator parcial de segurança para as propriedades dos materiais, que tem em conta as incertezas de modelação das variações dimensionais;
γ_R	Fator parcial de resistência;
ρ_k	Valor característico da massa volúmica da madeira;
ρ_{mean}	Valor médio da massa volúmica;
φ	Ângulo entre os elementos primários e secundários;
ε	Ângulo entre a direção do fio e o eixo do ligador
$\varepsilon_{u,timber}$	Valor da extensão da madeira paralela ao fio;
$\sigma_{c,90,d}$	Valor de cálculo da tensão perpendicular ao fio;
τ_d	Valor de cálculo da tensão de corte;

Siglas:

CEN	Comité europeu de normalização;
CEN/CT 250	Comissão técnica 250 do comité europeu de normalização;
CT 14	Comissão técnica 14
CT 115	Comissão técnica 115
DVW	<i>Densified Veneer Wood</i> (Folhas de madeira densificadas);
EC5	Eurocódigo 5;
EYM	<i>European yield model</i> ;

FRP	Polímero reforçado com fibras;
IPQ	Instituto português de qualidade;
LNEC	Laboratório nacional de engenharia civil
LVL	Madeira micro lamelada colada;
MC	Madeira maciça;
MLC	Madeira lamelada colada;
MLCC	Madeira lamelada colada cruzada;
ONS	Organismo de normalização sectorial
OSB	Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas;
PSF	Ponto de saturação das fibras;
SCT 5	Subcomissão técnica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do tronco de uma árvore (LNEC E31, (1995)).	27
Figura 2 - Direções ou eixos principais (Smith, 1999).	28
Figura 3 - Classificação de resistência da madeira (LNEC M1, 1997).	29
Figura 4 - Retração da madeira (Coutinho, 1999).	31
Figura 5 - Viga Carbonizada (Anastácio, 2010).	34
Figura 6 – Vigas de madeira maciça (Green, 1999).	38
Figura 7 – Aplicação de MLC numa estrutura e uma secção transversal de MLC (Almeida, 2012).	39
Figura 8 - Complexo Municipal de Piscinas, Almada (Costa, 2013).	39
Figura 9 – Painel LVL (Green, 1999).	40
Figura 10 -Painel OSB (Silva, 2014).	41
Figura 11 – Aglomerado de partículas (Silva, 2014).	42
Figura 12 - Aglomerado de fibras de madeira (Silva, 2014).	43
Figura 13 - Ligações tradicionais: a) Entalhe; b) cruzamento; c) empalme (Barbosa et al., 2017).	47
Figura 14 – Ligação colada: a) Ligação por “finger-joints” e b) Pórtico de madeira com ligação colada. (Manfred, 2008).	48
Figura 15 - Várias formas de aplicação dos varões colados (Steiger et al., 2015).	49
Figura 16 - Conectores metálico: a) Pregos; b) cavilhas; c) Parafuso de porca; d) parafuso autorroscante; e) anel aberto; f) Placa metálica dentada; g) chapa metálica dentada (Kuklik, 2008).	50
Figura 17 - Definição dos vários parâmetros dos ligadores do tipo cavilha (prEN 1995-1-1, 2020).	55
Figura 18 - Modos de rotura para um ligador em corte simples segundo o EYM (prEN 1995-1-1, 2020).	60
Figura 19 - Modos de rotura para um ligador em corte duplo segundo o EYM (prEN 1995-1-1, 2020).	60
Figura 20 – Especificação para os ligadores inseridos nos produtos de madeira lamelados e definição dos vários ângulos (prEN 1995-1-1, 2020).	63
Figura 21 - Relação entre os produtos com base em madeira e um parafuso de porca ou cavilha inserido com $\alpha=90^\circ$ e $\beta=90^\circ$.	69
Figura 22 - Relação entre os produtos com base em madeira e um parafuso de porca ou cavilha inserido com $\alpha=45^\circ$ e $\beta=45^\circ$.	69
Figura 23 - Relação entre o Momento de Cedência Plástica e a Tensão Última do aço	72

Figura 24 - Ligadores inclinados na direção do fio (prEN 1995-1-1, 2020).	83
Figura 25 - Ligadores inclinados em duas direções (prEN 1995-1-1, 2020)	83
Figura 26 - Modos de rotura em grupo (prEN 1995-1-1, 2020).	84
Figura 27 - Representação das forças do modo de rotura em bloco. (prEN 1995-1-1, 2020).	87
Figura 28 - Rotura da parte superior do bloco (prEN 1995-1-1, 2020).	88
Figura 29 – Ações nos ligadores para a determinação da componente da força perpendicular ao fio (prEN 1995-1-1, 2020).	94
Figura 30 – Ligadores planos (Porteous & Kermani, 2007).	97
Figura 31 – Especificação das dimensões do tubo de aço (prEN 1995-1-1, 2020).	97
Figura 32 – Relação entre a resistência lateral do tubo de aço (A) e a deformação (B) (prEN 1995-1-1, 2020).	99
Figura 33 – Exemplo e especificação de um varão colado (prEN 1995-1-1, 2020).	101
Figura 34 - Exemplo das áreas efetivas para a determinação da resistência à tração da madeira (prEN 1995-1-1, 2020).	104
Figura 35 – Área efetiva para cavilhas inseridas com um determinado ângulo ao fio da madeira (prEN 1995-1-1, 2020).	105
Figura 36 - Modos de rotura para a resistência lateral das cavilhas coladas (prEN 1995-1-1, 2020).	106
Figura 37 - Especificação dos espaçamentos e distâncias mínimas para forças paralelas ao fio (prEN 1995-1-1, 2020).	107
Figura 38 - Especificação dos espaçamentos e distâncias mínimas para forças perpendiculares ao fio (prEN 1995-1-1, 2020).	108
Figura 39 – Ligação tradicional: a) Entalhe Simples; b) Entalhe duplo (Palma, 2009)	109
Figura 40 - Esquema da ligação proposta (Bell, 2008)	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de proteções mínimas contra a corrosão e de requisitos mínimos dos materiais para os ligadores metálicos (EN 1995-1-1, 2004).	32
Tabela 2 - Normas aplicadas às ligações das estruturas de madeira.	52
Tabela 3- Valores da profundidade de incorporação (prEN 1995-1-1, 2020).	61
Tabela 4 – Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para pregos e agrafos (prEN 1995-1-1, 2020).....	64
Tabela 5 - Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para parafusos (prEN 1995-1-1, 2020).	66
Tabela 6 - Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para parafusos de porca e cavilhas (prEN 1995-1-1, 2020).....	67
Tabela 7 - Momentos de cedência plástica para os ligadores do tipo cavilha (prEN 1995-1-1, 2020)..	71
Tabela 8 – Valores de $kT,1$ (prEN 1995-1-1, 2020).	73
Tabela 9 – Valores de $kT,2$ (prEN 1995-1-1, 2020).	73
Tabela 10 - Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador para madeira maciça, MLC e MLCC (prEN 1995-1-1, 2020).....	75
Tabela 11 - Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador para LVL e GLVL (prEN 1995-1-1, 2020).....	75
Tabela 12 - Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador para contraplacado (prEN 1995-1-1, 2020).....	75
Tabela 13- Valor característico do arranque da cabeça do ligador para OSB (prEN 1995-1-1, 2020). .	76
Tabela 14- Valor característico do arranque da cabeça do ligador para aglomerado de partículas (prEN 1995-1-1, 2020).....	76
Tabela 15- Valor característico da resistência ao arranque dos Prego nervurado (prEN 1995-1-1, 2020).	77
Tabela 16- Valor característico da resistência ao arranque dos parafusos (prEN 1995-1-1, 2020).	77
Tabela 17 - Valor característico da resistência ao arranque dos agrafos (prEN 1995-1-1, 2020).....	78
Tabela 18 - Valor característico da resistência ao arranque dos pregos lisos (prEN 1995-1-1, 2020) ..	78
Tabela 19 - Valores característicos da resistência à tração do ligador metálico (prEN 1995-1-1, 2020).	79

Tabela 20 - Valores para o expoente da equação (prEN 1995-1-1, 2020).....	80
Tabela 21 - Espaçamentos mínimos recomendados para parafusos solicitados axialmente e inclinados (prEN 1995-1-1, 2020).....	82
Tabela 22 – Valores do fator parcial de resistência γ_R (Adaptado prEN 1995-1-1, 2020).....	92
Tabela 23 - Requisitos mínimos para os tubos de aço (prEN 1995-1-1, 2020).....	98
Tabela 24 – Valores para a determinação da resistência lateral do tubo de aço (prEN 1995-1-1, 2020).	98
Tabela 25 – Valores mínimos para a força característica do adesivo, $f_{vr,k}$, em N/mm ² (prEN 1995-1-1, 2020).....	102
Tabela 26 - Espaçamentos e distâncias mínimas para cavilhas coladas (prEN 1995-1-1, 2020).....	107
Tabela 27 - Valores para os materiais da ligação	116
Tabela 28 - Espaçamentos e distâncias mínimas da ligação	116
Tabela 29 - Confirmação dos valores dos espaçamentos e distâncias mínimas da ligação	118
Tabela 30 – Valores obtidos no dimensionamento da ligação	129

CAPÍTULO 1

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Desde os primórdios da humanidade, o Homem teve necessidade de se proteger dos perigos envolventes, como o caso do clima ou dos animais selvagens, e como a madeira era uma matéria-prima abundante, foi utilizada nas primeiras construções. Segundo Lourenço & Branco (2012) o uso da madeira decorre em cada civilização, de forma singular e independente, de acordo com as características e necessidades da mesma, até porque, são alguns agentes próprios de cada época que determinam o método usado para a construção em madeira.

A variedade de espécies de árvores origina uma enorme complexidade, no que diz respeito aos conhecimentos necessários para a sua trabalhabilidade, ou seja, quando se realiza uma análise das propriedades físicas ou das propriedades organoléticas, estas variam de espécie para espécie, até mesmo, na mesma espécie entre origens diferentes. Com isto, pretende-se dizer que a madeira apresenta uma grande variedade das suas propriedades físicas e mecânicas.

Existem outras propriedades, que dependendo da espécie da árvore, são comuns entre elas, como por exemplo, a estrutura celular de origem biológica, a natureza anisotrópica e a higroscopia. Outras características comuns das espécies de madeira encontra-se no facto de esta ser inflamável, apesar de ser resistente ao fogo, e a sua suscetibilidade ao ataque dos agentes xilófagos, devido ao facto de se tratar de um material orgânico.

A utilização de estruturas de madeira promove a construção sustentável, na medida em que, é um material natural, renovável, mas também o principal absorvente do dióxido de carbono da atmosfera, já que, o carbono é o elemento principal da madeira.

A madeira é um dos três materiais mais utilizados na construção, em parceria com o betão armado e o aço. Comparando os três materiais, a madeira realça-se através da sua baixa densidade, um fator

importante para a execução de vãos de grande dimensão ou estruturas altas, devido ao facto que, o peso próprio do material é uma das principais cargas presentes neste tipo de construção (Ramage et al., 2017). Em situações sísmicas, a massa volúmica dos materiais destaca-se como um fator importante, dado que, quanto maior for a massa, maiores são as forças mássicas (sísmicas) na estrutura.

O interesse nas estruturas de madeira tem vindo a aumentar, não só devido à sua excelente relação entre a resistência e o seu peso, mas também devido ao seu custo reduzido e facilidade de execução, que reduz o tempo de construção das estruturas. Além disso, o desenvolvimento de ligações mais eficientes, com o aparecimento de novas técnicas, que visam facilitar o dimensionamento deste material, contribuem para a economia do mesmo (Hilário, 2013).

De acordo com Hilário (2013), a evolução tecnológica trouxe novos materiais como os derivados da madeira que permitiram a criação de estruturas mais resistentes, tirando partido de menores volumes de madeira. Os seus derivados apresentam desempenhos superiores às da madeira maciça, uma vez que, os defeitos da madeira, presentes nos derivados, encontram-se mais dispersos e reduzidos.

O aparecimento dos Eurocódigos permitiu criar um conjunto de normas europeias para o projeto de estruturas de edifícios e outras obras de engenharia civil. Com este efeito, permitiu aos projetistas a introdução de novos materiais, como o exemplo da madeira na concessão de novas estruturas, concorrendo com os materiais mais utilizados na construção civil, o betão e o aço. O recurso às estruturas de madeira aumentou e a sua utilização em coberturas de polidesportivos, piscinas e salas de espetáculos, tem contribuído para a divulgação das suas potencialidades estruturais e arquitetónicas (Branco, 2003).

Em suma, devido aos avanços tecnológicos e ao surgimento de novas técnicas e materiais os Eurocódigos Estruturais encontram-se em revisão, como o objetivo de melhorar o dimensionamento das estruturas e atualizar ao nível dos novos materiais disponíveis no mercado. Neste trabalho, destacam-se as alterações que ocorreram no Eurocódigo 5, mais precisamente, nas ligações do tipo cavilha das estruturas de madeira.

1.2 Objetivos e metodologia

O objetivo desta dissertação é o de analisar a nova geração do Eurocódigo 5 no que toca ao capítulo das ligações, em particular, aquelas que podem ser classificadas como do tipo cavilha. A nova versão do Eurocódigo 5 será analisada salientando as principais alterações que ocorreram no capítulo das ligações,

comparando com a versão atual (EN 1995-1-1: 2004). Nesta análise, sempre que possível discutir-se-á os fundamentos que justificam as alterações, as novas considerações, etc.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. Em primeiro lugar, é realizado um enquadramento geral do estudo a realizar e os objetivos do mesmo.

Seguidamente, no *Capítulo 2* aborda-se a utilização da madeira como material de construção. Começa-se por falar da evolução da madeira nas estruturas, de seguida, aborda-se alguns conhecimentos técnicos sobre o material, tais como, a sua constituição ou os defeitos, que se podem encontrar nos seus elementos. Neste capítulo, refere-se também as suas propriedades físicas e mecânicas. Por fim, apresenta-se alguns dos seus derivados presentes no mercado e à disposição dos projetistas.

No *Capítulo 3* introduzem-se as ligações, descrevendo-se os vários tipos de ligações das estruturas de madeira. De seguida, apresenta-se as entidades responsáveis pela regulamentação em Portugal e algumas normas, relativas às ligações. No que diz respeito às ligações do tipo cavilha apresenta-se um pequeno resumo de como o seu dimensionamento se realizava, com o Eurocódigo 5, comparado com as alterações que se realizaram com a revisão do documento.

O *Capítulo 4* foca-se no tema fulcral da dissertação, o dimensionamento das ligações para as estruturas de madeira de acordo com o novo Eurocódigo 5. Para tal, demonstram-se os vários fatores necessários para o dimensionamento, salientando os novos parâmetros, ligações ou materiais presentes no documento e que não se encontram no Eurocódigo, tentando explicar estas novas considerações para o dimensionamento das ligações.

No *Capítulo 5* apresenta-se um exercício prático com o objetivo de salientar as principais diferenças no dimensionamento dos ligadores do tipo cavilha.

Por último, no *Capítulo 6* expõem-se as principais conclusões e listam-se futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO 2

2. A madeira na construção

2.1 Enquadramento histórico

A madeira foi sempre uma matéria-prima muito abundante no mundo. A evolução das estruturas de madeira não ocorreu apenas com o passar do tempo, mas também sofreu influências de outras naturezas, como a modificação dos solos e do clima e a necessidade de proteção do Homem face aos perigos externos (Lourenço & Branco, 2012).

Primeiramente, os abrigos naturais, como as cavernas e grutas, apresentaram-se como o modo de proteção mais simples encontrado, porém, com a adoção de novas técnicas, planeamento e arquitetura começaram a aparecer as primeiras habitações, que marcaram cada período da história.

Retomando à Pré-história, onde a imaginação e a criatividade permitiram ao Homem a criação de vários objetos e abrigos temporários, através dos materiais envolventes e propícios à construção. Os ramos, os pequenos troncos e as folhas ou cascas de árvores destacaram-se como as matérias-primas mais utilizadas. As ligações realizavam-se através de cordas tecidas com as fibras das folhas ou com lianas. Como exemplo da construção adaptada nesta época encontram-se as cabanas e as palafitas.

Dando um salto até à Idade Antiga, que se encontra marcada pelo aparecimento das primeiras grandes civilizações. Estas cidades localizavam-se perto das margens dos rios, em terrenos áridos e sem floresta, originando uma rede comercial através destes. Nesta época, a madeira apresentou numerosas vantagens que não passaram despercebidas. Os primeiros barcos construíram-se com recurso à madeira, uma vez que esta flutua, e foram-se aperfeiçoando com o tempo (Lourenço & Branco, 2012). No que diz respeito às habitações, a viga de madeira e o adobe prevalecem como os principais materiais utilizados na construção, uma vez que, a matéria-prima mais abundante era a terra.

Com o passar do tempo, as técnicas e os conhecimentos sobre a madeira aumentaram e o aparecimento de novos materiais conduziu a outro tipo de construção. Na Idade Média, as ferramentas existentes ainda

não eram apropriadas para a obtenção de grandes pranchas de madeira, uma vez que a técnica de serragem não se encontrava muito desenvolvida, guiando à construção com recurso a troncos. Por outro lado, com a necessidade de alcançar habitações mais resistentes, recorreu-se ao uso da pedra, como novo material de construção, e ao processo de triangulação, dando origem às Cruzes de Santo André.

Nos finais da Idade Média, a destreza dos carpinteiros e artífices permitiu construir edifícios até cinco ou seis pisos. Deste modo, muitos edifícios da Idade Média e Renascimento construídos em madeira resistiram tanto ou mais do que os executados em pedra e tijolo (Lourenço & Branco, 2012). Neste século, começou-se a introduzir a construção habitacional com recurso a alvenaria e tijolos, que reduzia as telas e os entrelaçados de ripas.

Atualmente, é notável o crescimento da utilização da madeira na construção civil, devido à sua vasta variedade de soluções construtivas, propriedades físicas e mecânicas, que oferecem ao produto final um conforto térmico e uma grande aptidão estética, ligado a um consumo de energia reduzido. Além disso, obtêm-se soluções criativas, modernas e de elevada qualidade para os diversos problemas arquitetónicos e estruturais. O aparecimento dos vários derivados de madeira permitiu aos projetistas apresentarem várias soluções para as construções atuais, garantindo produtos de elevada resistência, baixa variação comportamental e de alta tipificação, que se pode aplicar em pequenas habitações familiares ou na execução de grandes estruturas.

A procura de uma construção sustentável é impulsionadora das estruturas em madeira, por ser o único material, utilizado na construção, que é natural, renovável, reciclável e que armazena dióxido de carbono.

2.2 A madeira, como material

A madeira, empregue na construção, é um material natural, biológico, heterogéneo e anisotrópico, sendo a sua origem proveniente dos troncos das árvores. É um material resistente e leve, o que permite a sua utilização para fins estruturais (Martins, 2010).

Na natureza existe uma enorme variedade de espécies de árvores, que podemos organizar em dois grandes grupos botânicos, as angiospérmicas (vulgarmente designadas por folhosas ou madeiras duras – *Hardwoods*) e as gimnospérmicas (vulgarmente designadas de resinosas, coníferas ou madeiras brandas – *Softwoods*). As árvores folhosas apresentam um crescimento lento e as suas folhas são achatadas e largas, por outro lado, as árvores resinosas caracterizam-se por um crescimento rápido e as suas folhas são circulares.

Como já foi referido, os troncos das árvores destacam-se por serem o principal componente para a produção de elementos estruturais de madeira. Neste realça-se o borne e o cerne (figura 1). No borne encontram-se as células vivas, onde ocorre o armazenamento de alimento e o movimento mecânico da seiva. Por outro lado, no cerne situam-se as células mortas, fundamentais para o suporte da árvore. Estas duas camadas do tronco distinguem-se devido à sua resistência, decomposição e às suas cores, sendo que, o borne destaca-se por ser mais claro e com menor resistência à degradação.

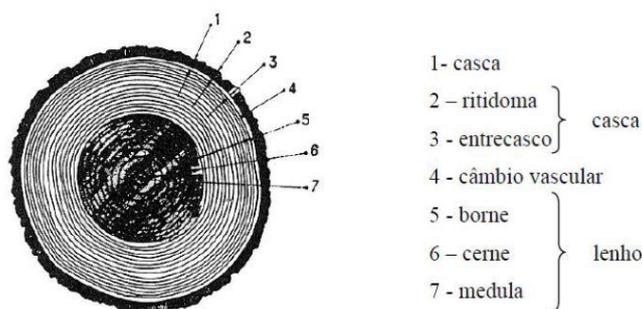


Figura 1 – Representação do tronco de uma árvore (LNEC E31, (1995)).

As fibras da madeira são constituídas por pequenas e alongadas células em forma de tubo, podendo ser circulares ou retangulares. As paredes dessas células são constituídas por celulose – substância que é responsável pela capacidade resistente que a madeira apresenta. As fibras encontram-se ligadas por um polímero designado por lenhina e orientam-se segundo a direção longitudinal do tronco da árvore (Almeida, 2012).

No que diz respeito à orientação das fibras, a madeira destaca-se por ser um material anisotrópico, onde as suas propriedades variam consoante a orientação das fibras. Assim, realça-se as três direções principais de um elemento de madeira, como a longitudinal, radial e axial (ver figura 2). Estes eixos tornam-se importantes quando se pretende analisar o desempenho físico e mecânico do material. A direção longitudinal designa-se, frequentemente, por direção paralela às fibras. As direções radial e tangencial, ambas perpendiculares às fibras, correspondem, respetivamente, a um qualquer raio definido na seção transversal e a uma qualquer tangente às camadas de crescimento.

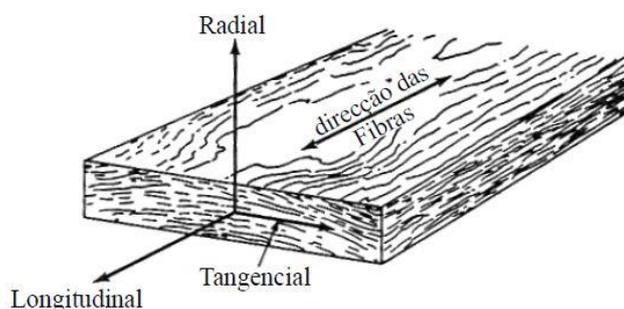


Figura 2 - Direções ou eixos principais (Smith, 1999).

Segundo Coutinho (1999), a composição química da madeira constitui-se por cerca de 60% de celulose, que se forma por hidratos de carbono (carbono, oxigénio e hidrogénio) e que integra a maior parte das paredes das células, por cerca de 28% de lenhina (substância dura e corada, impermeável, pouco elástica, com uma resistência mecânica apreciável e insensível à humidade e temperaturas habituais), sendo os outros constituintes óleos, resinas, açúcares, amidos, taninos, substâncias nitrogenadas, sais orgânicos e ácidos orgânicos.

Além disso, a madeira apresenta determinadas singularidades que podem comprometer a sua utilização e, conseqüentemente, a diminuição das suas propriedades. Como os principais defeitos, que se identificam a olho nu, evidenciam-se os nós, as fendas e o fio inclinado.

O nó apresenta-se como o processo inicial da formação de um ramo da árvore inserido no tronco, com uma direção perpendicular à do fio da madeira. Estes condicionam a resistência em tração dos elementos de madeira, a aparência da madeira e o desvio do fio.

As fendas também constituem um problema para as peças de madeira, na medida em que as variações de volume ou as aplicações incorretas de cargas provocam o aparecimento deste defeito. Quando ocorre a retração da madeira, devido à humidade, desenvolvem-se descontinuidades na direção do fio que enfraquecem o material. Por outro lado, as fendas anelares, que se caracterizam pelo afastamento dos anéis de crescimento, formam-se devido às forças aplicadas na árvore durante o seu crescimento.

O fio inclinado ocorre quando o eixo longitudinal da peça e a direção do fio não coincidem. Isto, deve-se ao facto, do mau corte das peças de madeira ou de anomalias de crescimento da árvore. Este defeito torna-se relevante quando se realiza a aplicação de cargas, pois podem acontecer esforços elevados perpendiculares ao fio.

Em suma, para que a madeira se possa utilizar como material estrutural deve-se conhecer as suas propriedades mecânicas.

Este processo realiza-se através de dois níveis de classes, sendo estas a classe de qualidade e a classe de resistência, como se encontra ilustrado na figura 3.

A classe de qualidade da madeira determina-se segundo um conjunto de regras de limitação de defeitos ou segundo a avaliação de uma propriedade mecânica. Estes métodos baseiam-se na classificação visual, a fim de se identificar os vários defeitos no elemento de madeira, ou na realização de ensaios, de modo a salientar uma propriedade mecânica da espécie de madeira, como por exemplo o seu módulo de elasticidade. Segundo LNEC M1 (1997), a classe de resistência permite a seleção das propriedades mecânicas do material a utilizar sem que para isso seja necessário ter conhecimento das madeiras disponíveis no mercado.

Madeira	Classe de Qualidade (norma)	Classe de Resistência
Pinho bravo (<i>Pinus pinaster</i> Ait.)	E (NP 4305)	C18*
Casquinha (<i>Pinus silvestris</i> L.)	SS (BS 4978)	C24
	GS (BS 4978)	C16
Espruce (<i>Picea abies</i> Karst.)	S13 (DIN 4074)	C30
	S10 (DIN 4074)	C24
	S7 (DIN 4074)	C16
Câmbala (<i>Milicia excelsa</i> A. Chev. Ou <i>M. regia</i> A. Chev.)	HS (BS 5756)	D40

* Para a classe E do Pinho bravo, recomenda-se a adopção dos valores indicados na Ficha LNEC M2: "Pinho bravo para estruturas".

Figura 3 - Classificação de resistência da madeira (LNEC M1, 1997).

2.3 Propriedades físicas da madeira

2.3.1 Humidade ou teor em água

Quando se realiza o abate de uma árvore para a obtenção da sua matéria-prima, qualquer que seja a sua espécie, esta apresenta uma elevada quantidade de água. Essa água apresenta-se na madeira sob três formas: água de constituição, água de impregnação ou embebição e água livre.

A água de constituição, que se mantém após os processos de secagem, encontra-se em combinação química com os principais constituintes do material lenhoso. Designa-se por madeira anidra (seca em estufa) aquela que apenas possui água de constituição (Coutinho, 1999).

A água de impregnação ou de embebição está presente nas paredes das células do material lenhoso. O volume da peça de madeira pode sofrer notáveis alterações consoante a quantidade de água de impregnação.

Assim que as paredes das células do material lenhoso começam a ficar preenchidas de água, esta começa a ocupar as cavidades das células, denominando-se, assim, por água livre. A água que circula livremente nas cavidades não tem qualquer influência no volume da madeira.

Após o abate, a madeira perde, mais ou menos, de forma rápida a sua água livre. Este processo verifica-se até que toda a água livre seja expulsa, mantendo-se nas paredes celulares toda a água de impregnação – situação que corresponde ao Ponto de Saturação das Fibras (PSF). Desde o estado verde até ao PSF, a madeira não sofre alterações apreciáveis (retração ou resistência mecânica) (Cruz & Nunes, 2014).

Quando o valor do teor em água se encontra acima do PSF apenas se verifica a redução do peso da madeira, não ocorrendo qualquer alteração nas suas dimensões. Por outro lado, quando o teor em água decai para valores inferiores ao PSF, as paredes começam a perder água, começando a contrair-se e a diminuir de espessura, originam fenómenos de retração.

2.3.2 Retração

A retração caracteriza-se pela redução das dimensões de uma peça de madeira, sendo que, a diminuição de volume está relacionada com a saída da água de impregnação.

É importante salientar que, a madeira apresenta um comportamento anisotrópico, isto é, as alterações, que ocorrem neste material, dependem da direção das fibras de madeira, deste modo, o fenómeno de retração não se estabelece da mesma forma nas diferentes direções referidas.

Através da figura 4, pode-se concluir que é importante conhecer o ponto de saturação das fibras, devido ao facto que, quando a humidade da madeira se encontra abaixo do PSF, a peça de madeira sofre variações de dimensões significativas, daí que, as retas apresentam um determinado declive. Por outro lado, também pode ocorrer o processo inverso se a madeira estiver exposta a condições de alta humidade, assim, em vez de libertar água, a madeira sofre um aumento dimensional devido à absorção de água.

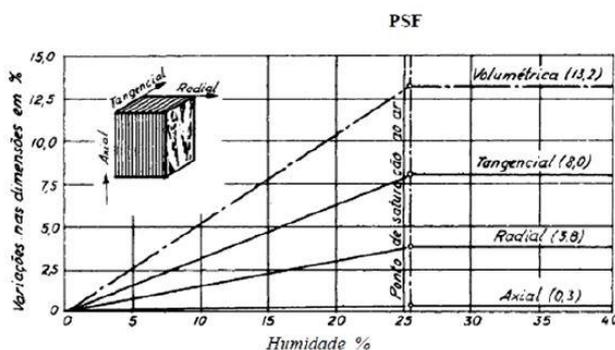


Figura 4 - Retração da madeira (Coutinho, 1999).

2.3.3 Massa volúmica

A massa volúmica calcula-se, para um determinado valor do teor em água, através do quociente entre a massa e o volume da peça. É importante salientar que, maior parte das propriedades físicas da madeira dependem deste parâmetro, e que, segundo a NP 616 (1973), esta propriedade serve de referência para a classificação das peças de madeira. A massa volúmica da madeira varia desde 100 a 1500 kg/m³ (para um teor de água de 12%). Através do ábaco de *Kollmann* é possível estimar a massa volúmica para um determinado teor em água.

2.3.4 Durabilidade

Um dos pontos mais importantes das estruturas de madeira é a sua durabilidade. Segundo Cruz & Nunes (2014), a maioria das espécies com interesse comercial encontra-se caracterizada sob esse ponto de vista e dispõe de conhecimentos e meios para se saber em que condições deve ser aplicada e/ou de que modo podemos proteger a madeira de forma a prolongar a sua vida útil. Nos últimos anos tem-se verificado uma significativa evolução quanto à filosofia de proteção da madeira e aos métodos correntes de prevenção e tratamento, no sentido de uma abordagem menos agressiva para o ambiente e menos tóxica para o homem.

A maioria das espécies utilizadas na construção possuem uma determinada durabilidade natural, que permite manter-se em serviço durante séculos sem que percam as suas propriedades ou que seja aplicado qualquer tratamento. A durabilidade natural da madeira varia consoante a sua espécie, por outro lado, as suas características de impregnabilidade, isto é, a capacidade da madeira introduzir ou mover líquidos no seu interior, condiciona a sua prevenção, uma vez que, determinam a possibilidade de lhe ser conferida a devida proteção através de produtos preservadores.

Na norma EN 335 (2018) encontram-se as definições gerais sobre as classes de risco para as diferentes situações de serviço, relevantes para madeira maciça e produtos derivados de madeira. Nesta norma definem-se cinco classes de risco e os respetivos agentes biológicos relevantes que podem afetar a madeira, quando esta se encontra empregue numa estrutura.

Nas estruturas de madeira deve-se assegurar que a durabilidade natural ou a sua durabilidade com o devido tratamento protetor apresentam valores superiores ou iguais à classe de risco da estrutura presentes na EN 335 (2018). Deste modo, assegura-se a devida durabilidade de uma estrutura de madeira, consoante a comparação entre a durabilidade natural da madeira e a classe de risco, a que esta se encontra exposta, percebendo-se, facilmente, se é necessário recorrer a um tratamento protetor da madeira.

No que diz respeito à durabilidade das ligações nas estruturas de madeira, os valores mínimos para a proteção dos ligadores metálicos encontram-se no EC5 de acordo com a classe de serviço da estrutura em causa. Esta proteção tem como função garantir a durabilidade das ligações e, por conseguinte, da estrutura de madeira.

Tabela 1 - Exemplos de proteções mínimas contra a corrosão e de requisitos mínimos dos materiais para os ligadores metálicos (EN 1995-1-1, 2004).

Ligador	Classe de serviço		
	1	2	3
Pregos e parafusos de enroscar com $d \leq 4$ mm	Nenhuma	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 25c ^a
Parafusos de porca, cavilhas, pregos e parafusos de enroscar com $d > 4$ mm	Nenhuma	Nenhuma	Fe/Zn 25c ^a
Agrafos	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 12c ^a	Aço inoxidável
Placas metálicas cravadas e chapas de aço com $t \leq 3$ mm	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 12c ^a	Aço inoxidável

Tabela 1 - Exemplos de proteções mínimas contra a corrosão e de requisitos mínimos dos materiais para os ligadores metálicos (Continuação) (EN 1995-1-1, 2004).

Ligador	Classe de serviço		
	1	2	3
Chapas de aço com $3 \text{ mm} < t \leq 5 \text{ mm}$	Nenhuma	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 25c ^a
Chapas de aço com $t > 5 \text{ mm}$	Nenhuma	Nenhuma	Fe/Zn 25c ^a
^a No caso de ser utilizada uma proteção por galvanização a quente, deverá substituir-se Fe/Zn 12c por Z 275 e deverá substituir-se FE/Zn 25c por Z 350, de acordo com o disposto na EN 10147.			
Nota: Em condições especialmente corrosivas deverá adotar-se uma galvanização a quente mais forte ou prever a utilização de aço inoxidável.			

2.3.5 Resistência ao fogo

O fogo é um grande inimigo dos materiais aplicados na construção, na medida em que, quando estes se encontram expostos a uma fonte de calor, as suas propriedades alteram-se com o aumento da temperatura. Contudo, no caso da madeira, a exposição ao fogo faz com que a sua secção diminua de forma gradual sem qualquer alteração das suas propriedades.

De acordo com Anastácio (2010), a baixa condutividade térmica da madeira torna-se numa vantagem quando este material se encontra exposto ao fogo, pelo facto que dificulta a propagação da temperatura para as zonas que se encontram mais próximas da combustão, evitando a dilatação excessiva da estrutura.

Na figura 5 encontram-se representadas as várias camadas de um elemento de madeira carbonizado. A combustão na superfície do material origina uma camada carbonizada isolante, que dificulta a propagação do calor e do fogo para o seu interior. Contudo, a aproximadamente 5 milímetros da camada carbonizada, encontra-se a camada pirólise, a zona onde as propriedades da madeira se encontram alteradas devido as altas temperaturas. No interior do material, existe uma parte da secção, onde as propriedades originais não se encontram alteradas e que contribuem para a resistência da estrutura, sendo esta, denominada pela secção útil da madeira.

As ligações das estruturas de madeira inserem-se, normalmente, na secção útil da madeira, com a finalidade de garantir a segurança da estrutura e a devida proteção da ligação, uma vez que a madeira se degrada de forma gradual e a sua baixa condutividade térmica impede que as temperaturas elevadas afetem os ligadores metálicos.

Com o desenvolvimento tecnológico comprovou-se que a madeira apresenta várias vantagens neste tipo de situações, e que, devido às suas propriedades físicas e mecânicas, este material apresenta um comportamento diferente em comparação com os outros materiais utilizados na construção civil.



Figura 5 - Viga Carbonizada (Anastácio, 2010).

2.4 Propriedades mecânicas da madeira

Como já foi mencionado, a madeira é um material anisotrópico, pelo que a sua resistência depende da direção em que a carga é aplicada. Por simplificação, a análise das propriedades da madeira é dividida por duas direções: paralela ou perpendicular às fibras.

Por outro lado, os valores das várias propriedades mecânicas da madeira determinam-se a partir de ensaios normalizados, utilizando-se, para a sua realização, pequenos provetes de madeira isentos de defeitos. É importante referir que, num elemento de madeira os defeitos apresentam-se com os principais redutores da resistência da peça.

2.4.1 Resistência à compressão paralela ou perpendicular às fibras

A resistência à compressão perpendicular às fibras, como para todas as resistências nesta direção, é muito inferior ao valor exibido na direção paralela. Os valores característicos das espécies normalizadas variam entre os 4,3 e 13,5 N/mm² (EN 338, 2016). A compressão perpendicular ao fio provoca, no elemento de madeira, o esmagamento das paredes celulares das células de madeira, até que, se atinja

a tensão correspondente ao esmagamento das fibras. Quando a compressão diminui, a rigidez e a resistência aumentam, devido à transferência da carga, através das fibras, para as zonas descarregadas. Esta propriedade mecânica da madeira encontra-se, normalmente, nas ligações tradicionais ou nas zonas de apoio de vigas.

No caso da compressão paralela às fibras os valores característicos para a madeira maciça classificada encontram-se entre 16,0 e 34,0 N/mm² (EN 338, 2016). Quando a compressão paralela às fibras é muito elevada, as fibras tendem a encurvar, originando uma rotura dúctil, geralmente, de carácter local. Esta encurvadura das fibras reduz a resistência do elemento de madeira, aumentando as extensões até à sua rotura.

Segundo Branco (2003), em provetes de madeira isentos de defeitos, a resistência à tração, na direção paralela às fibras, apresenta valores superiores aos exibidos pela resistência à compressão na mesma direção. Contudo, para os respetivos valores característicos esta relação inverte-se. A existência de nós não influencia, significativamente, a resistência à compressão, por outro lado a resistência à tração é fortemente influenciada.

2.4.2 Resistência à tração paralela ou perpendicular às fibras

Os valores característicos da resistência à tração paralela às fibras podem variar entre os 8,0 e os 42,0 N/mm² (EN 338, 2016). Porém, deve-se ter em especial atenção aos defeitos da madeira, isto é, para provetes isentos de defeitos, os resultados obtidos apresentam valores superiores aos apresentados pelas resistências à flexão e à compressão. Contudo, devido à influência dos defeitos, os valores encontram-se reduzidos por elevados coeficientes de segurança, a fim de evitar a natureza frágil da rotura à tração.

Os valores característicos da resistência à tração perpendicular às fibras relativamente baixos, variando entre 1,0 e 2,0 N/mm² (EN 338, 2016). É importante referir que, este esforço deve ser evitado ou limitado, devido aos seus pequenos valores, resultantes da inexistência de travamento no sentido transversal das fibras longitudinais.

2.4.3 Resistência ao corte

De acordo com Branco (2003), o esforço de corte origina tensões tangenciais que atuam sobre as fibras de madeira segundo diversos modos:

- Tensões tangenciais de corte: as fibras são cortadas transversalmente por este esforço. A rotura ocorre por esmagamento;
- Tensões tangenciais de deslizamento: a rotura é produzida pelo deslizamento entre as fibras na direção longitudinal;
- Tensões tangenciais de deslizamento transversal: a rotação das fibras entre si leva à rotura localizada.

Os valores característicos da resistência ao corte, por deslizamento, encontram-se entre os 1,7 e 6,0 N/mm² (EN 338, 2016). No caso do deslizamento transversal, os valores variam cerca de 20% a 30% da resistência ao deslizamento longitudinal.

2.4.4 Flexão

A madeira apresenta um bom comportamento à flexão, devido à sua massa volúmica reduzida. Os valores característicos para a madeira maciça normalizada encontram-se entre os 14,0 e 70,0 N/mm² (EN 338, 2016).

De acordo com Branco (2003), a flexão resulta de um momento fletor que produz na peça tensões de tração e de compressão, na direção paralela às fibras. Uma vez que, o módulo de elasticidade é da mesma ordem de grandeza, em tração e em compressão, pode-se admitir que o diagrama de tensões normais é linear tomando os valores máximos para as fibras mais extremas. Quando a ordem de grandeza dos momentos aplicados é elevada, a distribuição das tensões normais na secção transversal deixa de ser linear, o valor das tensões aumenta até atingir o valor da resistência à compressão, para as fibras comprimidas, e da resistência à tração na zona tracionada da peça.

2.4.5 Elasticidade

A elasticidade está relacionada com a capacidade de os materiais recuperarem a forma ou dimensões iniciais, quando se remove uma carga/força, sendo que, para as espécies de madeira mais frequentes, os valores do módulo de elasticidade em flexão variam entre 7,0 e 20,0 kN/mm² (EN 338, 2016). É importante salientar que, quanto mais elevado for o módulo de elasticidade, maior será a resistência do material, reduzindo, assim, a capacidade de deformação do material.

Segundo Branco (2003), na direção perpendicular às fibras (E_{90}), recorre-se novamente a um único valor do módulo para compressão e tração, cujo valor é 30 vezes inferior ao módulo de elasticidade na direção paralela às fibras (E_0).

Esta característica revela-se muito vantajosa relativamente às estruturas de madeira, na medida em que, se for calculada com precisão torna-se um indicador do estado do esforço de um elemento ou da estrutura em si, porém deve-se ter em atenção à espécie da madeira e ao teor em água, pois podem alterar os valores do módulo de elasticidade.

2.4.6 Fluência

A fluência encontra-se dependente do tempo, baseando-se na variação da deformação que ocorre num determinado período, perante a ação de uma carga constante.

A madeira é um material viscoelástico, daí que, quando se encontra sujeito à ação de uma carga, além da deformação inicial, também ocorre um acréscimo da deformação com o tempo. Ou seja, quando se retira o carregamento uma parte da deformação mantém-se no tempo.

O teor em água realça-se por ser um fator que condiciona consideravelmente a fluência do material. As madeiras com teores em água mais elevados ou que se encontram submetidas a ciclos de humificação/secagem com frequência apresentam valores de fluência superiores.

O cálculo do fator fluência destaca-se, atualmente, pelas suas intensas pesquisas científicas, que visam a introdução de modelos fiáveis nas normas de projeto. De acordo com o Eurocódigo 5 o fator de fluência é dado pelo fator de deformação (k_{def}) que toma diferentes valores consoante a classe de serviço relevante (Martins, 2010).

2.5 Madeira e os vários derivados da madeira

2.5.1 Madeira maciça

A madeira maciça (ver figura 6) provém diretamente dos troncos das árvores, sem necessitar de qualquer tipo de colagem (Ferreira, 2017).

É importante referir que, a madeira maciça aplicada nas estruturas deve ser classificada em classes de qualidade ou resistência. A madeira não classificada pode ser empregue numa estrutura, no entanto,

implica que o cálculo seja efetuado de forma bastante conservadora o que torna as estruturas pouco económicas, existindo ainda, o risco de serem usadas peças inaptas para fins estruturais (Luzio, 2011).



Figura 6 – Vigas de madeira maciça (Green, 1999).

2.5.2 Madeira lamelada colada (MLC)

Com a evolução tecnológica combateu-se a heterogeneidade e anisotropia da madeira, tornando-a num material homogéneo e com maior resistência.

A madeira lamelada colada (ver figura 7) apresenta-se como um dos derivados de madeira mais antigos e utilizados na construção moderna. Este material constitui-se por tábuas/lamelas com a mesma orientação e coladas entre si, garantindo uma elevada qualidade e propriedades únicas, no que diz respeito à rigidez e resistência do material. Devido à sua flexibilidade e adaptabilidade, pode-se produzir em diferentes formas e dimensões consoante a necessidade do projetista. A espessura das lamelas destaca-se por ser um fator relevante, na medida em que, quanto menor for a sua espessura, melhores são os resultados esperados, já que, as secções reduzidas beneficiam de uma secagem mais rápida e fácil, tornando-se uma vantagem a nível técnico e económico.

A interligação entre elementos realiza-se por “*finger-joints*”, através de uma união topo a topo, não existindo uma barreira no tamanho e resistência de um elemento de MLC, na medida em que, esta união permite alcançar uma resistência característica à flexão.

Por fim, a EN 1194 (2002) distingue dois tipos de MLC, a homogénea e a combinada. A MLC homogénea é constituída por ter uma secção transversal, onde todas as lamelas apresentam a mesma classe de resistência e espécie. Por outro lado, a MLC combinada apresenta na sua secção transversal, lamelas de diferentes classes de resistência e espécies.



Figura 7 – Aplicação de MLC numa estrutura e uma secção transversal de MLC (Almeida, 2012).

2.5.3 Madeira lamelada colada cruzada (MLCC)

A madeira lamelada colada cruzada (figura 8) apresenta o mesmo processo construtivo da MLC, mas, neste caso, as lamelas encontram-se coladas perpendicularmente entre si, de modo a uniformizar a resistência nas duas direções (Gonçalves, 2012).

Segundo Silva et al., (2012), a MLCC considera-se como um material estável (dimensionalmente), uma vez que, o cruzamento das lamelas restringe os movimentos higroscópicos da madeira sujeita às variações do teor em água.

Este tipo de material utiliza-se na construção em altura apresentando um bom desempenho estrutural e às ações sísmicas, devido ao facto deste material apresentar um peso reduzido, uma boa ductilidade e resistência. Estes atributos diminuem as forças sísmicas, que atuam contra o edifício, reduzindo os danos estruturais e aumentando a segurança da mesma. Além disso, de acordo com Costa (2013) este material, não só apresenta um bom desempenho a nível acústico e térmico, mas também um bom comportamento face à ação do fogo.



Figura 8 - Complexo Municipal de Piscinas, Almada (Costa, 2013).

2.5.4 Madeira micro lamelada colada (LVL)

Com o objetivo de reduzir os desperdícios da madeira, desenvolveram-se vários derivados, sendo um dos casos a madeira micro lamelada colada (figura 9), um derivado de alta qualidade e com determinadas dimensões. O seu processo de fabrico consiste na colagem de folhas, devidamente classificadas e paralelas entre si, assegurando a orientação das fibras no sentido longitudinal. Através deste processo, reduzem-se os defeitos provenientes da anatomia das árvores, como o caso de nós, medulas ou desvio de fios.

O LVL apresenta uma maior resistência e uma estrutura mais homogénea do que a madeira lamelada colada, devido às dimensões reduzidas das folhas constituintes do material, que favorecem de uma melhor secagem e de defeitos mais reduzidos e dispersos.



Figura 9 – Painel LVL (Green, 1999)

2.5.5 Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (OSB)

As placas de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas (ver figura 10) constituem-se por duas camadas, sendo, a camada exterior composta pelas partículas orientadas paralelamente ao comprimento da placa e, a camada interior, com as partículas direcionadas de uma forma mais ou menos aleatória. Esta disposição fornece ao material uma melhor distribuição da resistência nos dois sentidos, longitudinal e transversal, como uma melhor estabilidade dimensional. Porém, este derivado de madeira encontra-se, no mercado, como o mais económico e o que apresenta menor resistência em comparação com os outros materiais.

Segundo a norma EN 300 (2006), os painéis de OSB encontram agrupados em 4 grupos:

- OSB/1: Placas para uso geral, incluindo decoração interior e mobiliário, em ambiente seco;
- OSB/2: Placas para fins estruturais em ambiente seco;

- OSB/3: Placas para fins estruturais em ambiente húmido;
- OSB/4: Placas para elevado desempenho estrutural em ambiente húmido.

No caso das placas para fins estruturais, o OSB/2 utiliza-se para as classes de serviço 1 em ambientes secos e o OSB/3 aplica-se nas classes de serviço 2 em ambientes húmidos.

De acordo com Ferreira (2017), a vantagem da utilização deste material reside, fundamentalmente, na facilidade de manuseamento, excelente relação entre resistência/peso e versatilidade.



Figura 10 -Painel OSB (Silva, 2014).

2.5.6 Aglomerado de partículas

Os resíduos provenientes da madeira serrada também podem ser reutilizados para produzir um derivado de madeira, através da sua ligação com resinas e colas especiais, originando os aglomerados de partículas (ver figura 11).

Este material apresenta duas camadas distintas, sendo que, na parte mais interna encontram-se as partículas de maiores dimensões e, na parte exterior, as partículas mais finas e com menores dimensões, a fim de garantir um acabamento liso e uniforme da sua superfície. A união destas partículas realiza-se através de uma prensagem a quente.

As suas características possibilitam uma utilização generalizada na indústria de mobiliário e de carpintaria.



Figura 11 – Aglomerado de partículas (Silva, 2014).

2.5.7 Aglomerado de fibras de madeira (MDF)

O aglomerado de fibras de madeira (ver figura 12) caracteriza-se, não só pela sua ótima resistência à humidade e ao fogo, mas também pela sua estabilidade, devido à orientação aleatória das fibras de madeira.

O seu fabrico inicia-se pelo desfibramento das lascas de madeira, provenientes da picagem dos toros das árvores. De seguida, estes materiais são aglomerados com resinas sintéticas e outros aditivos, com uma temperatura e pressão elevada, com o objetivo de formar um material compacto de superfície lisa em ambos os lados. Este processo garante ao MDF algumas características mecânicas que se aproximam às da madeira maciça.

As placas de MDF apresentam diferentes características, que dependem da sua utilização final. Assim, distinguem-se quatro tipos de placas de MDF:

- As placas “standard”;
- As placas ignífugas (resistentes ao fogo);
- As placas hidrófugas (resistentes à humidade);
- As placas de maior resistência mecânica (HD).



Figura 12 - Aglomerado de fibras de madeira (Silva, 2014).

CAPÍTULO 3

3. Ligações dos elementos de madeira

Nas estruturas de madeira as ligações entre os vários elementos de madeira representam, geralmente, os pontos mais delicados da estrutura, podendo condicionar o comportamento do conjunto no que diz respeito aos estados limite últimos, durabilidade e a resistência ao fogo (Branco, 2003).

É importante referir que, a ligação deve ser simétrica em relação ao plano médio da estrutura e, se possível, os elementos da ligação devem encontrar-se centrados, na medida em que, quando estas disposições não se executam, ocorrem para além das tensões primárias, tensões secundárias devido às excentricidades existentes entre os eixos mecânicos das peças interligadas e o centro de rotação da ligação.

De acordo com (Hilário, 2013), a simplicidade da solução estabelece-se como um fator importante para a ligação, uma vez que se traduz num modelo de cálculo mais realista e numa melhor perceção, por parte do projetista, daquilo que pode acontecer à ligação. A diversidade de ligações em estruturas de madeira garante uma gama de soluções para qualquer problema e desafiam a originalidade do projetista.

Em resumo, a grande variedade de ligadores para as numerosas soluções de ligação dos elementos de madeira, não só dependem da originalidade dos projetistas, mas também do seu conhecimento, no que diz respeito à rigidez das ligações, uma vez que permite uma melhor precessão das deformações, assim como, um melhor sistema de análise estrutural da construção. Deste modo, a regulamentação disponibiliza as várias informações, com o intuito de garantir um dimensionamento mais fiável e uniforme para a sociedade técnica.

3.1 Tipos de ligações

Para uma determinada estrutura, a seleção do tipo de ligação a utilizar, não só se define pelo tipo de carregamento aplicado ou pela capacidade de carga, mas também envolve considerações estéticas, processos de fabricação e uma relação entre o custo e a eficiência da ligação. Por outro lado, a ideia do

projetista para a execução da ligação também pode influenciar a decisão final. Contudo, é importante referir que, para a obtenção de uma ligação eficaz, deve-se recorrer ao modelo mais simples e que utilize o menor número de ligadores (Kuklik, 2008).

Como já foi mencionado, os inúmeros ligadores das estruturas de madeira podem-se agrupar em três grandes grupos: i) Ligações tradicionais; ii) Ligações coladas e iii) Ligações com elementos metálicos. Estes grupos distinguem-se pela forma como se realizam em obra, pelos materiais utilizados e, principalmente, pela forma como as forças se transmitem na ligação.

3.1.1 Ligações Tradicionais

As ligações tradicionais apresentam-se como as mais antigas e fundamentam-se, principalmente, no trabalho de carpintaria, que, segundo Branco & Descamps (2015) as suas configurações e ligações são geralmente complexas e testemunham um alto nível de habilidade, para além, de uma boa compreensão do comportamento estrutural, que resultou de um longo processo de tentativa erro.

Com a evolução tecnológica, a precisão do corte devido à eficácia das máquinas, proporcionou às ligações tradicionais uma melhor concessão e aplicação em obra, tornando-as, assim, mais pertinentes para as estruturas de madeira, como por exemplo, para a conceção das asnas aplicadas em coberturas de edifícios.

Os tipos de ligações tradicionais mais utilizadas nas estruturas de madeira são os entalhes, os cruzamentos e os empalmes (ver figura 13).

Os entalhes associam-se à formação de um sulco, em forma de “V”, nas superfícies dos elementos a ligar. Ao nível das superfícies dos entalhes, devido à redução efetiva da secção dos elementos geram-se, nesta zona, concentrações de tensões que se transmitem por compressão e/ou atrito na interface dos elementos ligados, sendo que, estas forças garantem a integridade da ligação e impedem que os elementos se separem (Barbosa et al., 2017).

Os cruzamentos correspondem à união de dois elementos de madeira através do seu corte, garantindo que a espessura da ligação seja a mesma para o membro com menor espessura, através de uma sobreposição perpendicular ou oblíqua. Por fim, os empalmes garantem a continuidade dos elementos topo a topo (Barbosa et al., 2017).

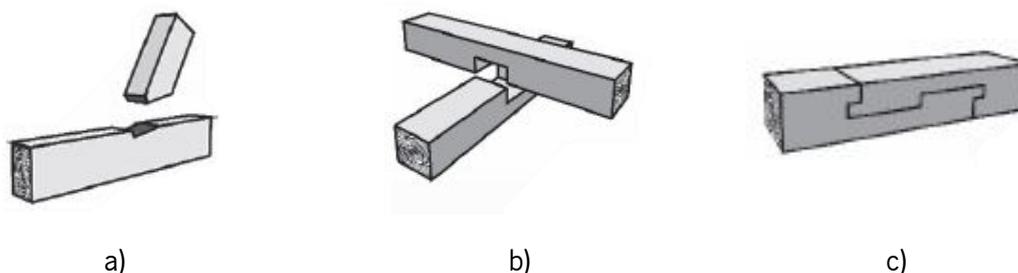


Figura 13 - Ligações tradicionais: a) Entalhe; b) cruzamento; c) empalme (Barbosa et al., 2017).

3.1.2 Ligações Coladas

As ligações coladas caracterizam-se por ser um meio eficaz de ligar dois elementos de madeira. Contudo, ainda existe uma falta de precisão, no que diz respeito às suas normas de dimensionamento, encontrando-se, apenas, algumas fórmulas analíticas provenientes de estudos desenvolvidos ou testes experimentais. Estas ligações devem ser executadas em fábrica, com a finalidade de garantir um controlo rigoroso da sua qualidade, porém, na aplicação em obra existem outros fatores externos, que podem afetar a ligação e que não se encontram contabilizados, como o caso da humidade.

Este tipo de ligações utiliza-se com frequência na união das lamelas para a produção dos derivados de madeira e na ligação transversal de elementos de madeira com elevadas larguras através da ligação por “*finger-joint*” (ver figura 14).

As ligações coladas encontram-se dependentes do tipo de adesivo empregue na ligação, isto é, o mínimo erro ao nível da aderência ou da aplicação do mesmo pode colocar a ligação em causa. Por outro lado, a elevada rigidez destas ligações promove o aparecimento de roturas frágeis. Contudo, segundo Custódio et al., (2009), as principais vantagens das ligações coladas encontram-se enumeradas nos seguintes aspetos, onde estas:

- Conseguem distribuir a carga aplicada por toda a superfície de contacto;
- Apresentam uma maior distribuição das tensões;
- Provocam nenhum ou pouco dano nos elementos a ligar;
- Adicionam pouco peso à estrutura global;
- Apresentam uma resistência à fadiga superior a qualquer outro tipo de ligação;
- Permitem ligar diferentes materiais;
- Podem reduzir os custos de manufatura.

Para além dos cuidados apresentados anteriormente, as ligações coladas apresentam outras limitações como o caso (Custódio et al., 2009):

- Necessidade de preparação cuidada da superfície de contacto;
- Alguns adesivos perdem resistência com temperaturas elevadas ou determinadas condições ambientais;
- Cuidados de inspeção e reparação muito complicados.

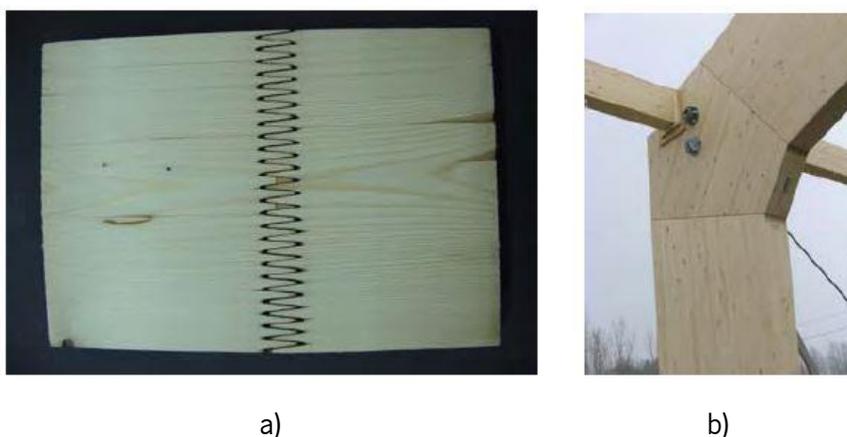


Figura 14 – Ligações coladas: a) Ligações por "finger-joints" e b) Pórtico de madeira com ligações coladas. (Manfred, 2008).

3.1.2.1 Varões Colados

Os varões colados apresentam-se como uma solução eficaz, quer para a execução de novas ligações, quer para a restauração do património existente. A pesquisa e o desenvolvimento dos varões colados, como ligação ou reforço, dos elementos estruturais de madeira encontra-se em andamento desde 1980 (Steiger et al., 2015). No entanto, não se alcançou nenhum acordo relativo ao dimensionamento destas ligações, permanecendo assim, excluída da norma relativa ao dimensionamento de estruturas de madeira.

Contudo, os avanços tecnológicos e os conhecimentos sobre os adesivos, utilizados na concessão das ligações e na produção de produtos derivados da madeira, e com o desenvolvimento de um conjunto de normas, com o objetivo de permitir a aplicação prática destas ligações em obra, possibilitaram a sua promoção ao Eurocódigo 5, favorecendo da revisão do documento. É importante referir que, os requisitos para o seu dimensionamento encontram-se no *Capítulo 4* deste trabalho.

Existem várias maneiras de se aplicar os varões. Inicialmente, realiza-se a pré furação do elemento e limpeza do orifício, tentando não exceder mais do que quatro milímetros do diâmetro do varão, não só

por os adesivos apresentarem um custo elevado, mas também por as linhas de cola mais finas exibirem bom desempenho.

Na figura 15 apresentam-se algumas formas de aplicação dos varões colados. Uma forma fácil e rápida de aplicação consiste em colocar o adesivo, e, de seguida, aplica-se o varão com a ajuda do seu peso próprio ou através da aplicação de uma força, introduz-se no orifício (figura 15a). Um problema desta aplicação passa pela falta de controlo da linha de cola, uma vez que não se consegue verificar a presença de vazios na mesma. Outro processo de aplicação encontra-se representado na figura 15b), onde se realiza um segundo furo, perpendicular ao varão, para se injetar o adesivo sob pressão, aplicando-se o varão ao mesmo tempo. Através desta técnica também se pode aplicar os varões no sentido horizontal, figura 15c), e no sentido vertical invertido, figura 15d).

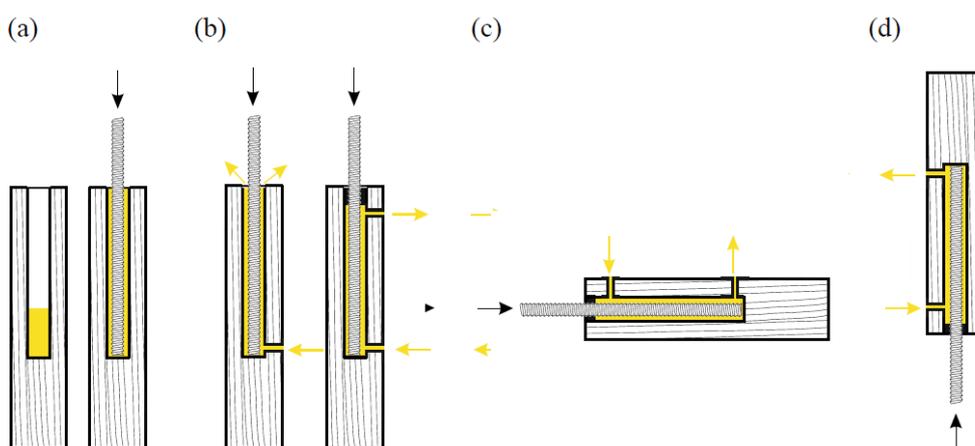


Figura 15 - Várias formas de aplicação dos varões colados (Steiger et al., 2015).

3.1.3 Ligações com elementos metálicos

Com a revolução industrial, que teve início no século XVIII, iniciou-se o uso das ligações com elementos metálicos na materialização de estruturas de madeira. Abandonou-se o uso das ligações tradicionais, muito por estas exigirem uma mão de obra minuciosa e prolongada, ao contrário das ligações com elementos metálicos que permitem uma rápida execução (Barbosa, 2015). Hoje em dia, existe uma vasta gama de ligadores metálicos à disposição do projetista, permitindo, a este, optar pelo que melhor se ajusta à ligação.

Na execução do seu dimensionamento deve-se conhecer os vários materiais utilizados nas ligações, ou seja, quer o aço, quer a madeira, apresentam diferentes características em relação às variações de volume devido à temperatura e humidade, provocando forças adicionais no sistema. Por um lado, deve-

se evitar a rotura frágil do ligador, mas por outro, a ductilidade do ligador metálico permite trabalhar em regime plástico. Deste modo, a classe de resistência do aço, não só tem influência na resistência do ligador, mas também na ductilidade do mesmo.

Estes ligadores podem ser divididos em dois grupos, de acordo com a forma que se transmite as forças, assim, distinguem-se os ligadores do tipo cavilha e os ligadores planos. De acordo com Almeida (2012), a transmissão das forças nos ligadores do tipo cavilha, ocorre, normalmente, através de esforços de flexão e de corte, através da pressão que o ligador exerce sobre a madeira, nomeadamente na superfície de furação, enquanto que, nos ligadores planos a força encontra-se distribuída, essencialmente, pela superfície da madeira em contacto com o ligador.

Na figura 16 realçam-se alguns conetores metálicos. Tome-se como exemplo dos ligadores do tipo cavilha os pregos, os parafusos de porca e autorroscante, agrafos e as cavilhas. Nos ligadores planos introduzem-se os anéis (abertos ou fechados), as placas metálicas (dentadas ou de pregar) e as placas circulares.

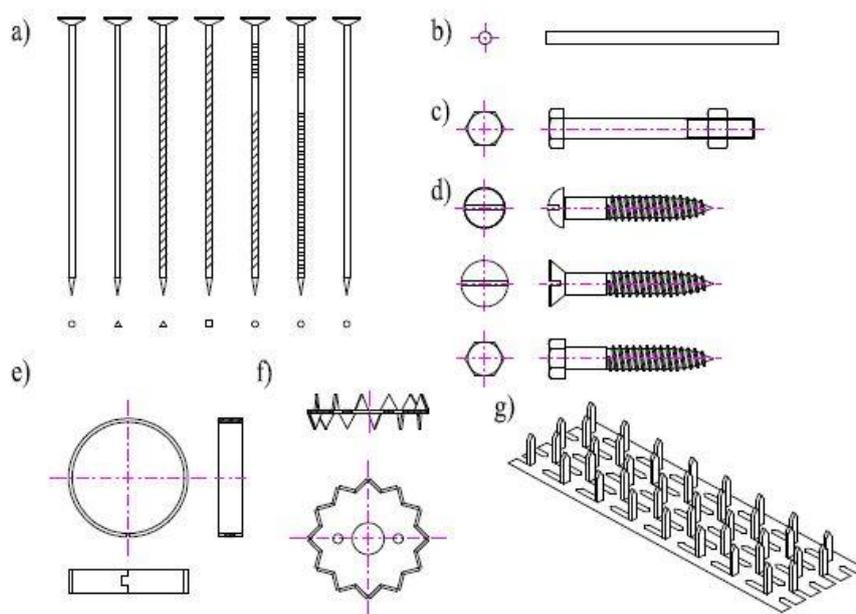


Figura 16 - Conectores metálico: a) Pregos; b) cavilhas; c) Parafuso de porca; d) parafuso autorroscante; e) anel aberto; f) Placa metálica dentada; g) chapa metálica dentada (Kuklik, 2008).

Os pregos possuem um diâmetro inferior a 8 mm, sendo que para determinados valores da massa volúmica da madeira deve realizar-se a pré furação para a sua introdução. Estes ligadores podem apresentar uma superfície lisa ou nervurada, porém, os pregos com superfície lisa complicam o

surgimento de forças adicionais, como o caso do atrito lateral, dificultando o seu comportamento em determinadas direções.

Os parafusos assumem-se como uma boa solução para as estruturas de madeira. Contudo, os seus diâmetros têm de ser reduzidos, de forma a evitar tensões na zona onde se encontram inseridos, podendo levar à separação dos fios de madeira. A sua utilização encontra-se normalizada, como o caso das distâncias mínimas de segurança, que permitem um melhor funcionamento da ligação, colocando mais material resistente entre as zonas críticas da secção. Por vezes, a solução adotada para a ligação passa pela utilização conjunta deste ligador com as chapas perfuradas.

Os parafusos de porca apresentam um diâmetro superior a 8 mm. O uso deste ligador encontra-se dependente das anilhas, entre a cabeça do ligador e o elemento de madeira, com a finalidade de distribuir o pré-esforço do parafuso por uma maior área de contacto no elemento de madeira, evitando o esmagamento localizado.

As cavilhas possuem uma superfície lisa ou nervurada e podem apresentar vários diâmetros. O seu uso requer a existência de pré furação do elemento de madeira.

Nos ligadores planos introduzem-se os anéis (abertos ou fechados), as placas metálicas (dentadas ou de pregar) e as placas circulares. As placas metálicas apresentam-se com uma espessura máxima de 2 mm e podem ser utilizadas em conjunto com pregos ou parafusos, respeitando o requisito do espaçamento entre ligadores, uma vez que, já se encontram adequadas para a utilização conjunta. As ligações através de placas circulares necessitam da produção de cortes nos elementos, onde se vai inserir as placas. Por outro lado, estas placas podem apresentar pequenos dentes, o que torna a ligação mais resistente através da sua cravação na madeira por um esforço de compressão. Semelhante as placas circulares, encontram-se os anéis, que se aplicam da mesma forma, mas apenas torna a ligação resistente ao esforço transversal.

3.2 Regulamentação aplicável e Eurocódigo 5

Atualmente, existem várias normas e regulamentos técnicos para que a madeira seja devidamente empregue nas estruturas. Em Portugal, e de acordo com Pina & Pontífice (2008), o acompanhamento da atividade relativa aos Eurocódigos tem estado a cargo da Comissão Técnica Portuguesa de Normalização (CT 115) – Eurocódigos Estruturais, cuja coordenação é assegurada pelo Laboratório

Nacional de Engenharia Civil (LNEC), designado pelo Instituto Português de Qualidade (IPQ) como Organismo de Normalização Sectorial (ONS) no domínio dos Eurocódigos Estruturais.

Dentro da Comissão Técnica destaca-se as subcomissões CT 14 e SCT 5. A primeira encontra-se relacionada com as madeiras empregues no sector de construção, enquanto a segunda se foca no Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira. Na tabela 2 apresentam-se algumas normas relativas às ligações das estruturas de madeira.

Tabela 2 - Normas aplicadas às ligações das estruturas de madeira.

Designação	Título
EN 409	Timber Structures – Test Methods – Determination of yield moment for dowel type fasteners – Nails.
EN 912	Timber Fasteners – Specifications for connectors for timber.
EN 1075	Timber Structures – Test Methods. Testing of joints made with punched metal plate fasteners.
EN 1380	Timber structures – Test Methods – Load bearing nailed joints.
EN 1381	Timber structures – Test Methods – Load bearing stapled joints.
EN 1382	Timber structures – Test Methods – Withdrawal capacity of timber fasteners.
EN 1383	Timber structures – Test Methods – Pull through testing of timber fasteners.
EN 1990	Eurocode: Basis of structural design.
EN 1991-1-1	Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Densities, self-weight and imposed loads.
EN 1995-1-1	Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings.
EN 1998	Eurocode 8: Design of structures for earthquakes resistance, when timber structures are built in seismic regions.
EN 10147	Continuously hot-dip zinc coated structural steel sheet and strip – Technical delivery regions.
EN 13271	Timber fasteners – Characteristic load-carrying capacities slip moduli for connector joints.
EN 14358	Timber structures – Fasteners and wood-based products – Calculation of characteristic 5-percentil value and acceptance criteria for a sample.

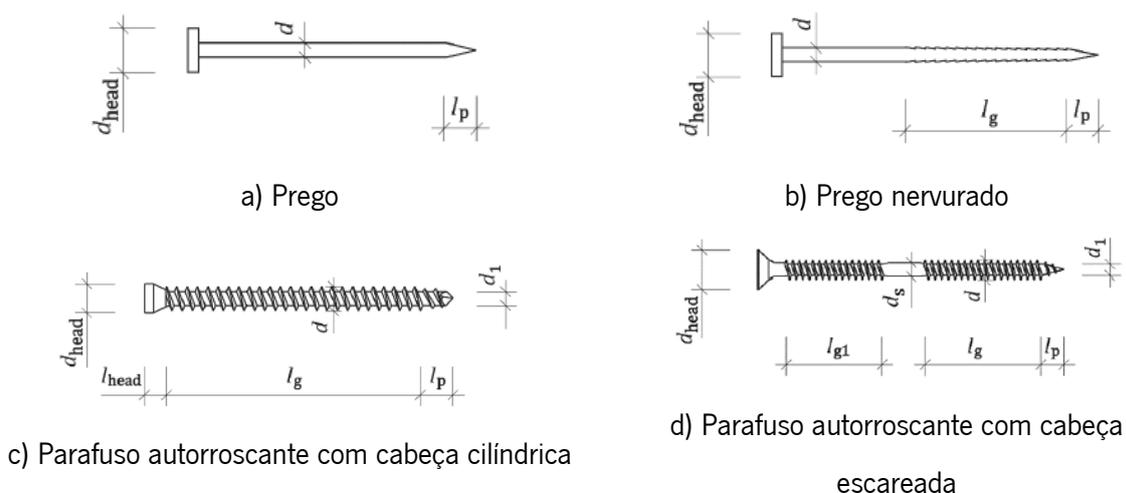
Tabela 2 - Normas aplicadas às ligações das estruturas de madeira (continuação).

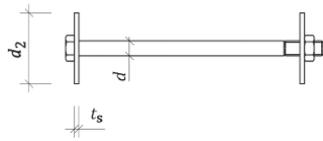
Designação	Título
EN 14545	Timber structures – Connectors – Requirements.
EN 14592	Timber structures – Fasteners – Requirements.
EN 26891	Timber structures – Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics.
EN 28970	Timber structures – Testing of joints made with mechanical fasteners; Requirements for wood density.

3.2.1 Regulamentação para as ligações do tipo cavilha

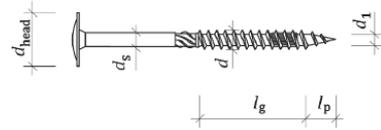
Antes de se iniciar o dimensionamento de uma ligação, em primeiro lugar, deve-se escolher o tipo de ligador e identificar as especificações técnicas, como o caso do diâmetro, tipo de aço ou comprimento do ligador. Estas denominações, ilustradas na figura 17, são facilmente identificadas devido à marcação CE, presente em todos os materiais aplicados no setor de construção, imposta pelo regulamento.

Para além das especificações técnicas dos ligadores deve-se, também, conhecer os fatores parciais de segurança (γ_M , $\gamma_{M,0}$ e $\gamma_{M,2}$) e o fator de modificação da madeira (k_{mod}) para que seja possível efetuar o seu dimensionamento nas estruturas de madeira. Sendo que, o último parâmetro tem em consideração a duração do carregamento e o teor em água de acordo com as condições de serviço da estrutura, apresentando-se como um fator relevante para a obtenção dos valores de cálculo.

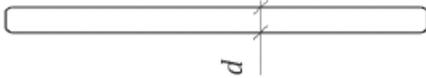




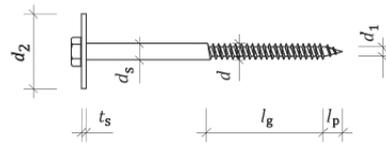
e) Parafuso com anilhas e porca



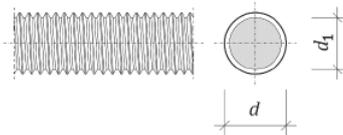
f) Parafuso parcialmente roscado com cabeça plana



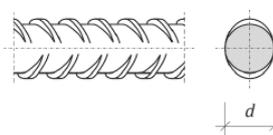
g) Cavilha lisa



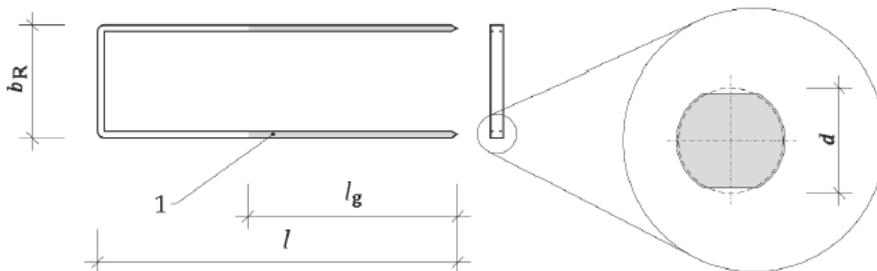
h) Parafuso deslizante com anilha



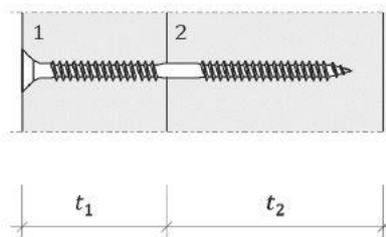
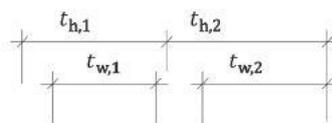
i) Cavilha enroscada



j) Cavilha nervurada



h) agrafó



i) Parafuso com dupla rosca inserido em 2 elementos

Legenda:

d Diâmetro do ligador;

d_{head} Diâmetro da cabeça do ligador;

d_1	Diâmetro interior dos parafusos;
d_2	Diâmetro da anilha;
d_s	Diâmetro da parte lisa do parafuso;
l	Comprimento do agrafão;
l_g	Comprimento da zona nervurada dos pregos, parafusos e agrafos;
l_p	Comprimento da ponta do ligador;
l_{head}	Comprimento da cabeça do ligador;
t_s	Espessura da anilha;
b_R	Largura do agrafão;
$t_1; t_2$	Espessura do elemento de madeira 1 e 2, respetivamente;
$t_{w,1}; t_{w,2}$	Comprimento de ancoragem no elemento 1 e 2, respetivamente;
$t_{h,1}; t_{h,2}$	Comprimento do ligador no elemento 1 e 2, respetivamente;

Figura 17 - Definição dos vários parâmetros dos ligadores do tipo cavilha (prEN 1995-1-1, 2020).

De acordo com o Eurocódigo 5, o cálculo da capacidade resistente dos ligadores do tipo cavilha, sujeitos ao corte, fundamenta-se na Teoria de Johanson e em desenvolvimentos posteriores, originando o *European Yield Model* (EYM) presente na norma.

Segundo Branco (2003), o EYM constitui um modelo de análise que possibilita a determinação da capacidade resistente das ligações do tipo cavilha entre dois ou três membros. Este método baseia-se no equilíbrio das tensões aplicadas no ligador inserido num elemento de madeira. Apesar de simples, o tratamento deste método sobre o complexo comportamento das ligações, revela uma elevada fiabilidade na quantificação prática da sua capacidade resistente. Para além das características geométricas da ligação, dois parâmetros essenciais governam este método: a resistência ao esmagamento localizado da madeira e o momento de cedência do ligador.

Os dois parâmetros, anunciados anteriormente, em conjunto designam-se pelo efeito cavilha da ligação. O segundo efeito destaca-se com a resistência à tração do ligador metálico e o atrito entre as superfícies da madeira, designando-se pelo efeito de corda do ligador. Porém, este último, não se considera no Eurocódigo 5, devido à variação entre as superfícies de contacto de madeira e à rugosidade, que são difíceis de quantificar.

O desenvolvimento das equações de Johanson gerem a resistência, quer em corte simples, quer em corte duplo, e estendem-se às ligações entre madeira-madeira, madeira-derivados de madeira e madeira-

chapas de aço. Cada equação mencionada encontra-se associada a um modo de rotura, sendo a resistência final da ligação obtida através do valor mínimo dos diferentes modos de rotura.

No entanto, a revisão, que se encontra em vigor no Eurocódigo 5, introduziu umas ligeiras alterações neste modelo de cálculo. Uma das principais alterações encontra-se na contribuição do efeito de corda para o cálculo da capacidade resistente dos ligadores do tipo cavilha, uma vez que, para determinados modos de rotura é necessário determinar a sua contribuição para o cálculo da resistência lateral por ligador e por plano de corte. Outra novidade encontra-se nos comprimentos de incorporação dos ligadores, que devem ser determinados, à parte, para determinados modos de rotura, quer corte simples, quer em corte duplo.

Também, é importante referir que, apenas se encontra uma fórmula para as ligações entre os vários elementos, e que nas ligações aço-madeira não se necessita de verificar a resistência da chapa de aço, algo que com o regulamento anterior era necessário realizar como um cálculo auxiliar. Com isto, apenas se apresentam dez modos de rotura.

Estes procedimentos e expressões encontram-se no *Capítulo 4*, onde se apresenta um maior detalhe na sua explicação.

Em suma, os procedimentos inseridos com a revisão do regulamento surgem, não só para melhorar o dimensionamento das ligações das estruturas de madeira, mas também como forma de auxiliar os projetistas para uma melhor perceção da ligação. Estes procedimentos e pormenores relativos a este novo regulamento encontram-se presentes no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

4. O novo Eurocódigo 5

A revisão do Eurocódigo 5 pretende atualizar o estado dos conhecimentos ao incluir materiais e técnicas que foram consolidados nos últimos anos, com a finalidade de melhorar o dimensionamento das estruturas de madeira. No capítulo das ligações ocorreram várias modificações, em especial nas ligações do tipo cavilha, onde se alargaram as possíveis tipologias de ligações, incluíram-se parâmetros que definem com mais exatidão o seu comportamento e foram atualizadas as metodologias de dimensionamento.

Algumas das ligações, que foram introduzidas com a revisão do Eurocódigo, já se aplicavam nas estruturas de madeira por algumas empresas de construção, no entanto, o seu dimensionamento não se realizava através de uma norma europeia, mas sim, com recurso a documentos e pesquisas realizadas por vários técnicos especializados.

Em suma, neste capítulo realiza-se uma análise das várias modificações que ocorreram ao nível do Eurocódigo 5 para o cálculo das ligações do tipo cavilha, e, sempre que possível, analisam-se as alterações comparando com a versão em vigor deste regulamento.

4.1 Rigidez de uma ligação

A rigidez de uma ligação exibe um papel fundamental na distribuição de esforços nos vários elementos da estrutura. Quando as ligações se apresentam como rígidas, a rotura ocorre ao nível dos elementos de madeira, o que se deve evitar devido à possibilidade de acontecer uma rotura frágil.

Nos Estados Limite de Utilização, a rigidez de uma ligação depende do valor médio da massa volúmica da madeira (ρ_{mean}) e do diâmetro do ligador (d). As fórmulas de cálculo do modo de deslizamento (k_{ser}) são as mesmas apresentadas no EC5. Porém, no caso da ligação de um elemento de madeira e outro de betão, o valor médio da massa volúmica da madeira deve ser multiplicado por dois.

Por outro lado, a revisão do Eurocódigo acrescentou algumas expressões, não só para se determinar a combinação do módulo de deslizamento lateral e axial ($k_{ser,\alpha,mean}$), quando se insere os ligadores com uma determinada inclinação, mas também para que seja possível determinar o mesmo para alguns derivados ou ligações.

$$k_{ser,\alpha,mean} = k_{ser,v,mean} \sin(\alpha)^2 + k_{ser,ax,mean} \cos(\alpha)^2 \quad (4.1)$$

Com:

$k_{ser,v,mean}$ Módulo de deslizamento lateral por ligador, em N/mm;

$k_{ser,ax,mean}$ Módulo de deslizamento axial por ligador, em N/mm;

α Ângulo entre o ligador e o fio do elemento de madeira, varia entre $30^\circ < \alpha < 85^\circ$.

No caso das ligações aço-madeira, através de placas metálicas perfuradas com madeira maciça e MLC, onde a madeira apresenta um valor característico da sua massa volúmica média até 350 kg/m^3 , o valor médio do módulo de deslizamento ($k_{ser,mean}$) determina-se de acordo com a norma EN 14545. No caso do LVL, deve-se conhecer o valor médio de referência da sua massa volúmica, para se obter o seu módulo de deslizamento.

Para as placas metálicas inseridas na madeira maciça ou MLC, o valor médio do módulo de deslizamento ($k_{ser,mean}$) determina-se através de testes ou de acordo com a expressão (4.2).

$$k_{ser,mean} = \begin{cases} k_{ser,mean} \left(\frac{\rho_{mean}}{350} \right) & \text{para madeira maciça e MLC} \\ k_{ser,mean} & \text{para LVL} \end{cases} \quad (4.2)$$

Com:

ρ_{mean} Valor médio da massa volúmica, em kg/m^3 ;

$k_{ser,mean}$ Módulo de deslizamento de referência para o LVL, em N/mm.

4.2 Tipo Cavilha

Os elementos de fixação do tipo cavilha são meios de junção do tipo mecânico, que transmitem os esforços mediante dos elementos metálicos que atravessam as peças. Normalmente, estes elementos de ligação encontram-se submetidos a esforços de flexão e de corte. A transferência de carga realiza-se através da flexão do ligador, por pressão diametral e corte da madeira ao longo do seu comprimento (Branco, 2003).

Em primeiro lugar, destacam-se os ligadores metálicos do tipo cavilha, que são os mais utilizados para a conceção das ligações nas estruturas de madeira. Neste subcapítulo demonstra-se como se realiza o seu dimensionamento e as principais alterações que ocorreram no seu processo de cálculo. Por outro lado, uma das novidades introduzidas com a revisão do Eurocódigo são as cavilhas de madeira, apresentando-se as exigências necessários para a correta verificação de segurança desta ligação.

4.2.1 Resistência lateral de uma ligação por ligador e por plano de corte

Com a revisão do EC5, a resistência lateral de uma ligação por ligador e por plano de corte ($F_{v,d}$) calcula-se tendo em consideração o efeito de cavilha ($F_{D,k}$) e o efeito de corda do ligador ($F_{T,d}$). Por um lado, o efeito de cavilha determina-se através dos modos de rotura da ligação, mas por outro, o efeito de corda tem em consideração a resistência axial do ligador ($F_{ax,Rd}$). É importante referir que, quando os modos de rotura (a) e (b) predominam na ligação em estudo, não se considera o efeito de corda para o cálculo da resistência lateral do ligador (ver figura 18 e 19).

$$F_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} F_{D,k} + F_{T,d} \quad (4.3)$$

Com:

k_{mod} Fator de modificação;

γ_M Fator parcial de segurança;

$F_{D,k}$ Valor característico da contribuição do efeito cavilha, em N;

$F_{T,d}$ Valor de cálculo do efeito de corda, em N.

4.2.1.1 Contribuição do efeito cavilha para uma ligação

Para a determinação do efeito cavilha de uma ligação, adota-se a filosofia do EYM, já presente e utilizada pelo documento anterior, sendo que, para o caso de corte simples, destacam-se seis modos de rotura (ver figura 18) e no caso de corte duplo apresenta-se quatro modos de rotura (ver figura 19).

É importante salientar que, para cada modo de rotura associa-se uma expressão, para se obter o valor da respetiva resistência, e, no fim, a expressão que apresentar o menor valor associa-se ao modo de rotura predominante da ligação, sendo assim, o primeiro a ocorrer na ligação em estudo.

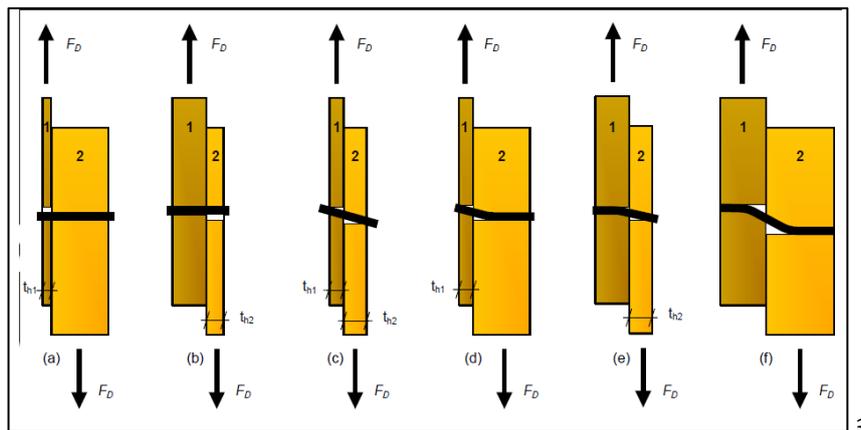


Figura 18 - Modos de rotura para um ligador em corte simples segundo o EYM (prEN 1995-1-1, 2020).

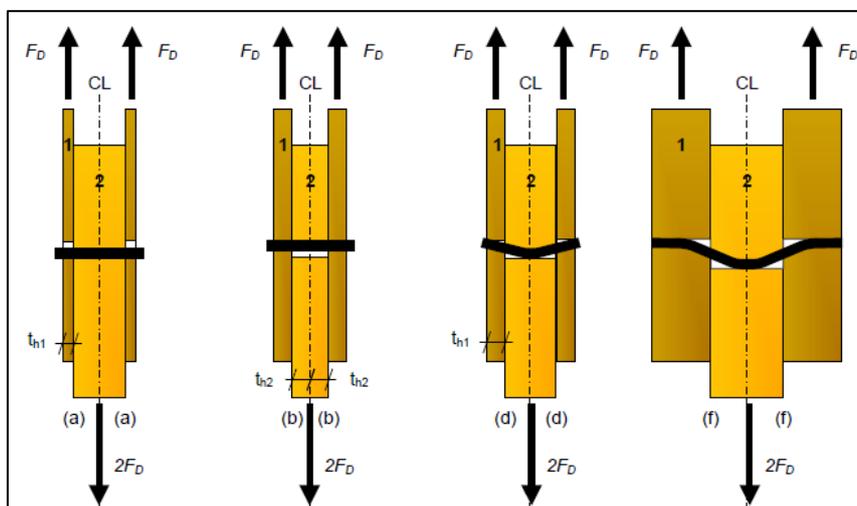


Figura 19 - Modos de rotura para um ligador em corte duplo segundo o EYM (prEN 1995-1-1, 2020).

O novo documento, procura facilitar o cálculo das ligações, deste modo uniformiza e propõe uma abordagem única, quer para uma ligação madeira-madeira, quer para uma ligação aço-madeira. Com isto, a expressão (4.4), apresenta-se como a única expressão de cálculo do efeito cavilha das ligações ($F_{D,k}$).

$$F_{D,k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_{h1} d & \text{(a)} \\ f_{h,2,k} t_{h2} d & \text{(b)} \\ \frac{f_{h,2,k} t_{h1} d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\frac{1}{\beta} + 2 \left[1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}} + \left(\frac{t_{h2}}{t_{h1}} \right)^2 \right]} + \beta \left(\frac{t_{h2}}{t_{h1}} \right)^2} - \left(1 + \frac{t_{h2}}{t_{h1}} \right) \right] & \text{(c)} \\ 1,05 \frac{f_{h,2,k} t_{h1} d}{2 + \beta} \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{4(2 + \beta) M_{y,k}}{f_{h,2,k} d t_{h1}^2}} - 1 \right] & \text{(d)} \\ 1,05 \frac{f_{h,2,k} t_{h2} d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2(1 + \beta) + \frac{4(1 + 2\beta) M_{y,k}}{f_{h,2,k} d t_{h2}^2}} - 1 \right] & \text{(e)} \\ 1,15 \times 2 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} \sqrt{M_{y,k} f_{h,2,k} d} & \text{(f)} \end{cases} \quad (4.4)$$

Com:

- β Razão entre $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$;
- $f_{h,1,k}; f_{h,2,k}$ Valores característicos da resistência ao esmagamento localizado, em N/mm²;
- $t_{h1}; t_{h2}$ Profundidade de incorporação nos membros 1 e 2 de acordo com a tabela 3;
- $M_{y,k}$ Valor característico do momento de cedência plástica, em Nmm;
- d Diâmetro do ligador, em mm.

Para determinados modos de rotura é necessário calcular os parâmetros relativos à profundidade de incorporação nos membros da ligação, quer seja em corte simples, quer seja em corte duplo. Estes determinam-se de acordo com as expressões apresentadas na tabela 3.

Tabela 3- Valores da profundidade de incorporação (prEN 1995-1-1, 2020).

	Membro 1	Membro 2
Corte simples:		
(d)	$t_{h1} = 1,05\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} d} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta}} \right)}$	$t_{h2} = 1,05\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} d} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \beta}} + \sqrt{2} \right)}$
(e)	$t_{h1} = 1,05\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} d} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta}} + \sqrt{2\beta} \right)}$	$t_{h2} = 1,15\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} d} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \beta}} \right)}$

Tabela 3- Valores da profundidade de incorporação (Continuação) (prEN 1995-1-1, 2020).

	Membro 1	Membro 2
Corte duplo:		
(d)	$t_{h1} = 1.05\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k}d}} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1+\beta}} \right)$	$t_{h2} = \frac{t_{h1}}{\beta}$
(e)	Não é aplicado	

Através deste processo apenas se utilizam seis fórmulas para o cálculo do efeito de cavilha dos ligadores ($F_{D,k}$) para as diversas situações de rotura apresentadas anteriormente.

É importante salientar que, nas ligações aço-madeira deve-se considerar o valor característico da resistência ao esmagamento localizado ($f_{h,1,k}$) com a tensão de cedência da placa de aço ($f_{y,k}$) e a profundidade de incorporação (t_{h1}) com a espessura da chapa.

De acordo com a versão atual do EC5, as ligações aço-madeira dependiam da espessura das chapas de aço, se se empregava uma chapa de aço delgada ou espessa, sendo necessário verificar a resistência da placa de aço da ligação, que, por vezes, não se realizava por parte dos projetistas devido ao seu esquecimento. Contudo, estes vários processos encontram-se modificados, uma vez que, ao utilizar o novo modelo de cálculo as fórmulas interpolam-se, automaticamente, entre placas de aço delgadas ou espessas. Os modos de rotura (b), (e) e (f) correspondem a uma placa de aço espessa, onde os ligadores são introduzidos nos orifícios da placa, de forma que, se desenvolva uma rótula na placa de aço. Por fim, o modo de rotura (a) diz respeito à resistência da placa de aço, o que não se abordava no EC5.

Os valores 1,15 e 1,05 presentes na equação (4.4), são demonstrados por Larsen (2010), onde, através da substituição dos valores ($\beta = 1,0$; $k_{mod} = 0,9$ e $\gamma_M = 1,3$) num módulo de rotura com duas rótulas obteve-se o valor 1,15. Por outro lado, o valor 1,05 encontra-se associado a um modo de rotura com uma rótula, porém não se conseguiu derivar matematicamente, sendo assim, um valor escolhido.

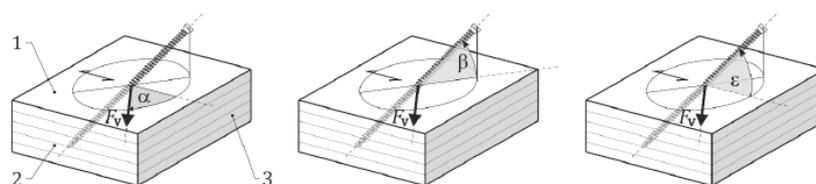
No que diz respeito aos modos de rotura em corte duplo, apenas são representados quatro modos (ver na figura 19), dado que, os modos de rotura (c) e (e) não podem ocorrer quando o segundo membro se encontra no meio. Além disso, a espessura do elemento central deve ser multiplicada por dois, uma vez que, se encontra associada a dois planos de corte.

4.2.1.2 Valor característico da resistência ao do esmagamento localizado

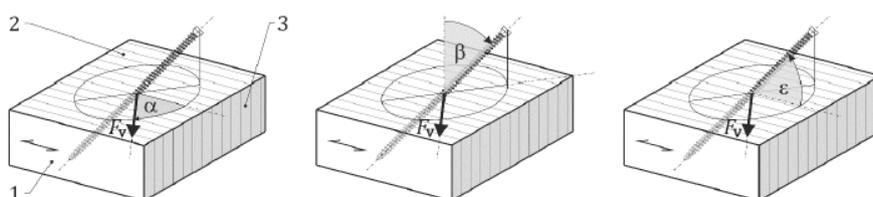
Para a determinação do valor característico da resistência ao esmagamento localizado dos elementos da ligação ($f_{h,k}$), deve-se conhecer, não só o tipo de ligador e o material dos elementos, mas também se ocorreu a pré furação do elemento de madeira para a introdução do ligador.

Em comparação com EC5, o cálculo da resistência característica ao esmagamento localizado apresenta novos parâmetros para a sua determinação e amplia-se para mais produtos que tem por base a madeira, tornando assim, mais ampla a sua aplicação.

Contudo, é importante referir que, nos elementos de madeira lamelados deve-se ter em atenção a forma como se insere os ligadores, uma vez que, quando os ligadores se introduzem paralelamente em relação às lamelas e nos topos dos elementos, estes podem provocar a separação das lamelas e danificar o material (ver figura 20b).



a) Ligadores inseridos na face do elemento e perpendiculares às lamelas



b) Ligadores inseridos no bordo do elemento e paralelos às lamelas

Legenda: 1) Face; 2) bordo do elemento; 3) Topo do elemento

Figura 20 – Especificação para os ligadores inseridos nos produtos de madeira lamelados e definição dos vários ângulos (prEN 1995-1-1, 2020).

Para as seguintes expressões considera-se:

- α Ângulo entre a direção do fio e a força, em graus, e representado na figura 20;
- ρ_k Valor característico da massa volúmica da madeira, em kg/m^3 ;
- d Diâmetro do ligador; em mm;

- ε Ângulo entre a direção do fio e o eixo do ligador, em graus, e representado na figura 20;
 β Ângulo entre o eixo do ligador e a face do elemento, em graus, e representado na figura 20;
 t_h Comprimento de incorporação do ligador no elemento, em mm, representado na figura 17i);
 t_1 Espessura do elemento, em mm, representado na figura 17i).

a. **Prego e agrafos**

Tabela 4 – Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para pregos e agrafos (prEN 1995-1-1, 2020).

Madeira maciça, MLCC; MLC e LVL (Resinosas)	Sem pré furação $d \leq 8$ mm	$f_{h,\alpha,\beta,k} = \frac{0,082\rho_k d^{-0,3}}{k_{ma}}$	(4.5)
	Todos os ângulos (α) e $\beta = 90^\circ$. k_c na expressão (4.10)	$k_{ma} = \begin{cases} 1,0 & \text{para Madeira Maciça} \\ \sin(\alpha)^2 + k_c \cos(\beta)^2 & \text{para LVL (Resinosas)} \end{cases}$	(4.6)
	Pré furação $d \leq 8$ mm	$f_{h,\alpha,\beta,k} = \frac{0,082(1 - 0,01d)\rho_k}{k_{ma}}$	(4.7)
		$k_{ma} = \begin{cases} 1,0 & \text{para Madeira Maciça} \\ \sin(\beta)^2 + k_c \cos(\beta)^2 & \text{para Resinosas LVL} \\ (k_{90}\sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2)(\sin(\beta)^2 + k_c \cos(\beta)^2) & \text{LVL} \end{cases}$	(4.8)
		$k_{90} = 0,5 + 0,024d$	(4.9)
	$k_c = \begin{cases} 1,0 & \text{para Resinosas LVL-P/ GLVL -P} \\ 1,2 & \text{para Folhosas LVL-P/ GLVL -P} \\ \min\left\{\frac{d}{(d-2)}, 3\right\} & \text{para LVL-C/GLVL-C} \end{cases}$	(4.10)	
Painéis maciços de madeira (SWP)	$d_h > 2d$ $t_{layer} = 7$ mm Sem Pré furação	$f_{h,k} = 60d^{-0,5} \left(\frac{\rho_k}{350}\right)$ inseridos na face	(4.11)
	Pré furado	$f_{h,k} = 20d^{-0,5}$ inseridos no bordo	(4.12)

Tabela 4 – Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para pregos e agrafos (Continuação) (prEN 1995-1-1, 2020)

Contraplacado	Sem pré furação	$f_{h,k} = 0,11\rho_k d^{-0,3}$	(4.13)
	Pré furado	$f_{h,k} = 0,11(1 - 0,01d)\rho_k$	(4.14)
OSB e Aglomerado de partículas	Sem pré furação	$f_{h,k} = 65d^{-0,7}t_h^{-0,1}$	(4.15)
	Pré furado	$f_{h,k} = 50d^{-0,6}t_h^{-0,2}$	(4.16)
MDF	$\rho_k \leq 150$ kg/m ³	$f_{h,k} = 15 \times 10^{-5}d^{-0,75}\rho_k^2$	(4.17)
	$150 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k \leq 300$ kg/m ³ $18 \text{ mm} \leq t_1 \leq 60 \text{ mm}$	$f_{h,k} = 4 \times 10^{-4}t_h\rho_k^{1,2}$	(4.18)
	$\rho_k \geq 300$ kg/m ³ $t_1 \geq 60 \text{ mm}$	$f_{h,k} = 20d^{-0,5}$ inseridos no bordo	(4.19)
Tábuas de madeira duras	Com ou sem pré furação	$f_{h,k} = 3,9d^{-0,3}t^{0,6}$	(4.20)
Painéis de gesso	Sem pré furação	$f_{h,k} = 3,9d^{-0,6}t^{-0,7}$	(4.21)
Painéis de partículas de cimento	Pré furado	$f_{h,k} = (75 + 1,9d)d^{-0,5} + \frac{d}{10}$	(4.22)

b. Parafusos

Tabela 5 - Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para parafusos (prEN 1995-1-1, 2020).

Madeira Maciça		$f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,019\rho_k^{1,24}d^{-0,3}}{\sin(\varepsilon)^2 + 2,5 \cos(\varepsilon)^2}$	(4.23)
LVL (Resinosas)	Sem pré furação $d \leq 12 \text{ mm}$	$f_{h,\beta,\varepsilon,k} = \frac{0,082\rho_k d^{-0,3}}{(\sin(\varepsilon)^2 + 2,5 \cos(\varepsilon)^2) (\sin(\beta)^2 + k_c \cos(\beta))^2}$	(4.24)
	Pré furado	$f_{h,\beta,\varepsilon,k} = \frac{0,082(1 - 0,01d)\rho_k}{(\sin(\varepsilon)^2 + 2,5 \cos(\varepsilon)^2) (\sin(\alpha)^2 + k_c \cos(\alpha))^2}$	(4.25)
		$k_c = \begin{cases} 1,0 & \text{para LVL-P/GLVL-P} \\ \min\left\{\frac{d}{(d-2)}, \frac{d}{3}\right\} & \text{para LVL-C/GLVL-C} \end{cases}$	(4.26)
LVL (Resinosas)	Pré furado $5 \text{ mm} \leq$ $d \leq 12 \text{ mm}$	$f_{h,\alpha,\beta,\varepsilon,k} = \frac{0,082\rho_k d^{-0,3}}{k_{ma}}$	(4.27)
		$k_{ma} = (\sin \varepsilon + 2,5 \cos \varepsilon) (k_{90} \sin \alpha^2 + \cos \alpha^2) (\sin \beta^2 + 1,2 \cos \beta^2)$	(4.28)
		$k_{90} = 0,5 + 0,024d$	(4.29)

c. Parafusos de porca e cavilhas

Tabela 6 - Valor característico da resistência ao esmagamento localizado para parafusos de porca e cavilhas (prEN 1995-1-1, 2020).

Madeira Maciça; MLCC; MLC e LVL (Resinosas)	Pré furado 8 mm ≤ d ≤ 30 mm	$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,082(1 - 0,001d)\rho_k}{k_{ma}}$	(4.30)
		$k_{ma} = \begin{cases} k_{90}\sin(\alpha)^2 + k_c \cos(\alpha)^2 & \text{para Madeira Maciça} \\ (k_{90}\sin \alpha^2 + k_c \cos \alpha^2)(\sin \beta^2 + k_c \cos \beta^2) & \text{para LVL} \end{cases}$	(4.31)
		$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{para Resinosas, MLC e MLCC} \\ 1,15 + 0,015d & \text{para LVL (Resinosas)} \\ 0,90 + 0,015d & \text{para Folhosas, LVL (Folhosas)} \end{cases}$	(4.32)
		$k_c = \begin{cases} 1,4 & \text{para LVL-C/GLVL-C (Folhosas)} \\ \min \left\{ \frac{d}{(d-2)}, 1,15 \right\} & \text{LVL (Resinosas) e LVL-P/GLVL-P} \end{cases}$	(4.33)
Contraplacado	Sem pré furação	$f_{h,k} = 0,11\rho_k d^{-0,3}$	(4.34)
	Pré furado	$f_{h,k} = 0,11(1 - 0,01d)\rho_k$	(4.35)
Tábuas duras	Pré furado ou não	$f_{h,k} = 30d^{-0,3}t^{0,6}$	(4.36)
OSB	Sem pré furação	$f_{h,k} = 50d^{-0,6}t^{-0,2}$	(4.37)
Chapas de aço	Pré furado	$f_{h,k} = 600 \text{ N/mm}^2$	(4.38)

Ao analisar-se as novas fórmulas para a determinação da resistência ao esmagamento localizado dos elementos de madeira ($f_{h,k}$) destaca-se a sua amplitude aos vários produtos com base em madeira. Também é importante referir que, esta resistência se encontra dependente do valor característico da massa volúmica da madeira (ρ_k), uma vez que, quanto maior for a massa volúmica do elemento de

madeira utilizado na ligação, este apresenta uma maior resistência ao esmagamento localizada, devido ao facto de existir mais material no elemento de madeira.

O novo parâmetro k_{ma} , presente nas fórmulas, considera os vários produtos constituídos por madeira e pondera a contribuição de cada derivado para o cálculo da resistência ao esmagamento localizado da madeira. Por outro lado, o aumento do valor deste parâmetro, promove uma redução na resistência do elemento ao esmagamento localizado.

Nas figuras 21 e 22, apresenta-se uma análise para a determinação dos valores de k_{ma} dos derivados de madeira lamelados e o LVL, provenientes de árvores Resinosas, com os diferentes diâmetros de um parafuso de porca ou cavilha. Salienta-se que, por um lado, a figura 21 diz respeito à introdução de um ligador perpendicular às lamelas (90°) e inserido na face do elemento, mas por outro, a figura 22 considera a introdução do ligador com uma determinada inclinação (45°) em relação à face do elemento. É importante referir que, não se apresentam gráficos para os derivados de madeira e LVL provenientes das árvores Folhosas, devido ao facto de os valores entre os dois materiais coincidirem.

Começando por analisar o gráfico da figura 21, concluiu-se que, a resistência ao esmagamento localizado apresenta valores inferiores nos derivados de madeira constituídos por lamelas, quando os ligadores se encontram inseridos na direção perpendicular às lamelas, enquanto, o LVL apresenta valores superiores para a resistência ao esmagamento localizado, uma vez que o parâmetro k_{ma} é inversamente proporcional à resistência ao esmagamento localizado. Em ambos os materiais o aumento do diâmetro provoca uma redução da resistência ao esmagamento localizado, uma vez que os valores de k_{ma} acompanham esse aumento, porém, esta redução da resistência apresenta-se da mesma forma nos dois materiais, devido ao facto de as retas serem paralelas.

Por fim, o gráfico da figura 22 expõe que, quando os ligadores se encontram inseridos com um determinado ângulo, o LVL não exhibe grandes variações na resistência ao esmagamento localizado da madeira, uma vez que a reta se mantém, praticamente, constante com o aumento do diâmetro do ligador. Nos derivados de madeira lamelados, o aumento do diâmetro provoca uma redução na resistência ao esmagamento localizado. Neste caso, ambos os materiais apresentam comportamentos diferentes, onde o LVL apresenta menores valores da resistência ao esmagamento localizado em comparação com os lamelados.

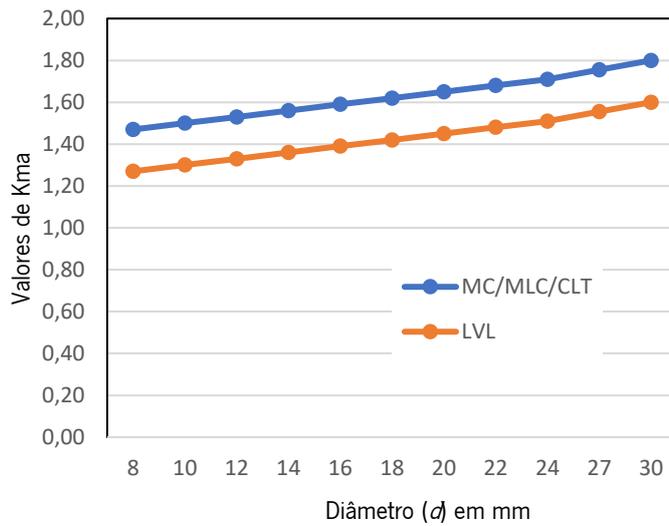


Figura 21 - Relação entre os produtos com base em madeira e um parafuso de porca ou cavilha inserido com $\alpha=90^\circ$ e $\beta=90^\circ$

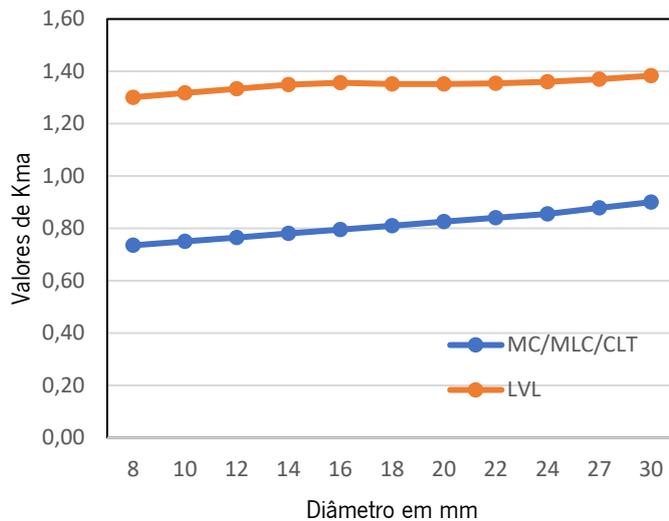


Figura 22 - Relação entre os produtos com base em madeira e um parafuso de porca ou cavilha inserido com $\alpha=45^\circ$ e $\beta=45^\circ$

4.2.1.3 Valor característico do momento de cedência plástica

Na determinação do momento de cedência plástica dos pregos considera-se que a resistência do aço seja de 600 N/mm^2 , devido às forças de tensão provocadas pelo endurecimento a frio do aço, com o objetivo de obter diâmetros reduzidos e com uma resistência do metal superior, demonstrando que a tensão de resistência do aço apresenta-se superior nos diâmetros mais pequenos. Os vários testes

realizados para este valor de resistência do aço demonstraram bons resultados para os vários pregos testados, sendo assim, adotado na expressão (4.39).

A expressão (4.40) apresenta-se com um expoente de 2,6 que tem em consideração o menor valor da curvatura dos parafusos para os maiores diâmetros, após uma deformação de 15 mm da ligação.

A expressão (4.42) obteve-se através de vários testes realizados, onde se concluiu que o momento de cedência plástica, não só depende da tensão última do aço ($f_{u,k}$), mas também da tensão de cedência ($f_{y,k}$).

Para as seguintes expressões considera-se:

- d Diâmetro do ligador; em mm;
- d_1 Diâmetro interno do ligador, em mm, representado na figura 17;
- $f_{s,k}$ Valor característico da resistência do arame, em N/mm²;
- $f_{u,k}$ Valor característico da resistência última do aço, em N/mm²;
- $f_{y,k}$ Valor característico da tensão de cedência do aço, em N/mm²;
- $f_{m,k}$ Valor característico da resistência à flexão das cavilhas de madeira, em N/mm².

Tabela 7 - Momentos de cedência plástica para os ligadores do tipo cavilha (prEN 1995-1-1, 2020).

Ligador	Limite	Momento de cedência plástica	
Pregos	$1,5 \leq d \leq 10$	$M_{y,k} = 0,3f_{s,k}d^{2,6}$ $f_{s,k} = 600 \text{ N/mm}$ Para pregos quadrados, para d considera-se a dimensão da secção transversal.	(4.39)
Parafusos	$d \leq 20$	$M_{y,k} = 0,3f_{u,k}d_1^{2,6}$	(4.40)
Parafusos de porca ou cavilhas (lisas ou nervuradas)	Varões nervurados: $d = d_1$	$M_{y,k} = \frac{1}{6}f_{y,ef}d^3$ $f_{y,ef} = \begin{cases} 0,45(f_{y,k} + f_{u,k}) & \text{se } f_{u,k} < 450 \text{ N/mm}^2 \\ 0,9f_{u,k} & \text{se } f_{u,k} \geq 450 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$	(4.41) (4.42)
Agrafos		$M_{y,k} = 150d^3$	(4.43)
Cavilhas de faia ou ocas com secção redonda	$12 \leq d \leq 30$	$M_{y,k} = \frac{\pi}{32}f_{m,k}d^3$	(4.44)

As fórmulas para o cálculo do momento de cedência plástica ($M_{y,k}$) dos vários ligadores do tipo cavilha dependem da resistência do aço. Este parâmetro torna-se importante referir, na medida em que, quanto maior for a classe de resistência do aço, o ligador apresenta uma boa resistência mecânica e um bom desempenho em ambientes com elevadas temperaturas, pressões ou trações, porém, torna-se intolerante a impactos e a sua ductilidade reduz-se.

A ductilidade de um ligador apresenta-se como uma maneira de assegurar que a estrutura apresente uma capacidade de aviso, resistente o suficiente, antes que ocorra a rotura do ligador. Em zonas sísmicas, este parâmetro torna-se pertinente, visto que, possibilita o aparecimento de uma rótula plástica na ligação, originando deformações controladas por parte das estruturas, melhorando o seu comportamento em situações próximas da rotura.

Com a implantação da marcação CE nos produtos utilizados na construção civil, facilmente se determina a tensão última ou a tensão de cedência de um ligador metálico. Tome-se como exemplo, um aço da classe de resistência 8.8, onde o primeiro algoritmo diz respeito à tensão última do aço ($f_{u,k} = 8 \times 100 = 800 \text{ N/mm}^2$), por outro lado, o segundo algoritmo quer dizer que a tensão de cedência do aço é de 80% da sua tensão última ($f_{y,k} = 0.8 \times 800 = 640 \text{ N/mm}^2$).

No gráfico da figura 23 encontra-se o valor característico do momento de cedência plástica para um parafuso de porca ou cavilha (lisa ou nervurada) com um diâmetro de 12 mm, mas com diferentes classes de resistência do aço. Através do gráfico, facilmente, se percebe que as maiores classes de resistência implicam maiores momentos de cedência plástica, porém, a ductilidade do ligador torna-se menor. Também se pode concluir que, entre as classes de resistência do aço 6.8 e 8.8, obtém-se uma diferença maior entre os valores do momento de cedência plástica, o que pode contribuir para uma análise interessante por parte do projetista, uma vez que, uma classe de aço superior conduz a um maior momento de cedência plástica e custo da ligação, contudo uma menor ductilidade, por outro lado, a classe de resistência inferior, apresenta menor momento e menor custo, no entanto, a ligação apresenta uma maior ductilidade.

É importante referir que, a alteração do diâmetro não altera a forma do gráfico, mas sim, os valores do momento de cedência plástica.

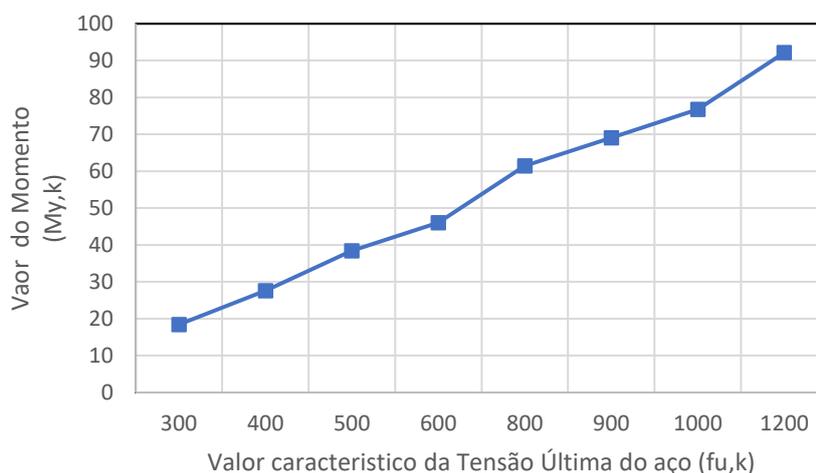


Figura 23 - Relação entre o Momento de Cedência Plástica e a Tensão Última do aço

4.2.1.4 Contribuição do efeito de corda do ligador

A contribuição do efeito de corda de um ligador deve ser adicionada aos modos de rotura (c) a (f). Através da expressão (4.45), apresenta-se como se determina o seu valor, recorrendo-se à resistência axial do ligador e aos devidos fatores de redução. Com a revisão do EC5, adicionou-se a tabela 8, no entanto, a tabela 9 retirou-se do EC.

$$F_{T,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{T,1} F_{ax,d} \\ k_{T,2} F_{D,d} \end{array} \right. \quad (4.45)$$

Com:

$F_{ax,d}$ Valor de cálculo da resistência axial de um ligador, em N;

$k_{T,1}$ Fator para o efeito de corda, tabela 8;

$F_{D,d}$ Valor de cálculo da contribuição do efeito cavilha, em N;

$k_{T,2}$ Fator de limitação do efeito de cavilha, tabela 9.

Tabela 8 – Valores de $k_{T,1}$ (prEN 1995-1-1, 2020).

Tipo de ligador	$k_{T,1}$
Em geral	0,25
Agrafos revestidos	0,4
Pregos nervurados	0,4

Tabela 9 – Valores de $k_{T,2}$ (prEN 1995-1-1, 2020).

Tipo de ligador	$k_{T,2}$
Pregos lisos e agrafos	0,15
Pregos quadrados	0,25
Pregos nervurados e Agrafos revestidos	0,5
Parafusos e hastes coladas carregadas lateralmente	1,0
Parafusos de porca	0,25
Cavilhas	0

4.2.2 Resistência axial de um ligador

No Eurocódigo 5, o cálculo da resistência axial ($F_{ax,Rd}$) apenas dependia da resistência ao arranque do ligador ($F_{w,k}$), porém, com a revisão da norma, o cálculo desta resistência encontra-se dependente de três verificações: i) capacidade resistente da cabeça do ligador ($F_{p,k}$), ii) da resistência ao arranque ($F_{w,k}$) e iii) resistência à tração do ligador ($F_{t,k}$).

Em seguida, apresenta-se a expressão para o cálculo desta resistência e os vários passos necessários para se determinar os parâmetros da mesma, de acordo com a nova versão do documento.

$$F_{ax,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \max \left\{ \begin{array}{l} F_{p,k} \\ F_{w,k} \end{array} \right. \\ \frac{F_{t,k}}{\gamma_{M,0}} \end{array} \right. \quad (4.46)$$

Com:

- $F_{p,k}$ Valor característico da capacidade resistente da cabeça do ligador, em N;
- $F_{w,k}$ Valor característico da capacidade resistente ao arranque do ligador, em N;
- $F_{t,k}$ Valor característico da capacidade resistente à tração do ligador, em N;
- k_{mod} Fator de modificação da madeira;
- $\gamma_M; \gamma_{M,0}$ Fatores parciais de segurança;

Primeiramente, o cálculo do valor característico da capacidade resistente da cabeça do ligador ($F_{p,k}$) determina-se de acordo com as expressões expostas nas tabelas 10 a 14, onde se deve ter em atenção o tipo de material que constitui os elementos de madeira.

Para as seguintes expressões considera-se:

- t_1 Espessura do elemento, em mm;
- A_{head} Área da cabeça do ligador, anilha ou placa de aço, em mm²;
- ρ_k Valor característico da massa volúmica da madeira, em kg/m³;
- $f_{head,k}$ Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador, em N/mm²;
- d_{head} Diâmetro da cabeça do ligador; em mm;
- t_s Espessura da anilha, em mm;
- ε Ângulo entre a direção do fio e o eixo do ligador, representado na figura 20.

a. **Madeira maciça, MLC e MLCC:**

Tabela 10 - Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador para madeira maciça, MLC e MLCC (prEN 1995-1-1, 2020).

$F_{p,k} = \begin{cases} A_{head}f_{head} & \text{se } A_{head} \leq 4072 \text{ mm}^2 \\ 3f_{c,90,k}A_{head} & \text{se } A_{head} > 4072 \text{ mm}^2 \end{cases}$	(4.47)
Com:	
$f_{head} = 17 - 0,23d_{head}$	(4.48)
$A_{head} = 4072 \text{ mm}^2 \text{ para } d_{head} = 72 \text{ mm}$	
Limites:	
<ul style="list-style-type: none"> • $t_1 \geq 4d$ • Com anilhas: A_{head} encontra-se limitado por $4\pi d^2$ e $36\pi t_s^2$. 	

b. **LVL e GLVL:**

Tabela 11 - Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador para LVL e GLVL (prEN 1995-1-1, 2020).

$F_{p,k} = f_{head,k}d_{head}^2 \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8}$	(4.49)
Com:	
$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6}\rho^2;$	(4.50)
$f_{head,k} = 70 - 0,8d_{head} \text{ para LVL proveniente da Faia } (\rho_k = 730 \text{ kg/m}^3).$	(4.51)
Limites:	
<ul style="list-style-type: none"> • $t_1 = \max \left\{ \begin{array}{l} 5d \\ (10d - 30) \frac{\rho_k}{400} \end{array} \right.$ • $\varepsilon \geq 30^\circ$. 	

c. **Contraplacado:**

Tabela 12 - Valor característico da resistência ao arranque da cabeça do ligador para contraplacado (prEN 1995-1-1, 2020).

$F_{p,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 11t_1\sqrt{A_{head}} \\ 10t_1^2 \end{array} \right.$	(4.52)
No caso de parafusos aumenta-se 30%.	
Limites:	
<ul style="list-style-type: none"> • $9 \text{ mm} \leq t_1 \leq 18 \text{ mm};$ • Para espessuras maiores, pode usar $t=18 \text{ mm}$. 	

d. **OSB:**

Tabela 13- Valor característico do arranque da cabeça do ligador para OSB (prEN 1995-1-1, 2020).

$F_{p,k} = \min \begin{cases} 9t_1\sqrt{A_{head}} \\ 8t_1^2 \end{cases}$	(4.53)
Limites:	
<ul style="list-style-type: none"> • $9 \text{ mm} \leq t_1 \leq 18 \text{ mm}$; • Para espessuras maiores, pode usar $t=18 \text{ mm}$. 	

e. **Aglomerado de partículas:**

Tabela 14- Valor característico do arranque da cabeça do ligador para aglomerado de partículas (prEN 1995-1-1, 2020).

$F_{p,k} = 4 \times 10^{-4} t_1 \rho_k^{1,2}$	(4.54)
Limites:	
<ul style="list-style-type: none"> • $18 \text{ mm} \leq t_1 \leq 60 \text{ mm}$; • $150 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k \leq 300 \text{ kg/m}^3$; • Para valores superiores pode usar $t_1 = 60 \text{ mm}$ e $\rho_k = 300 \text{ kg/m}^3$. 	

Em seguida, para se determinar o valor característico da capacidade resistente ao arranque do ligador ($F_{w,k}$) recorre-se à expressão (4.55) e às tabelas 15 a 18. Neste passo, as expressões de cálculo sofreram algumas modificações, mas as condições de redução ou de acerto dos valores não sofreram alterações, permanecendo as mesmas apresentadas no Eurocódigo 5.

$$F_{w,k} = \pi d t_w f_{w,k} \tag{4.55}$$

Com:

- t_w Comprimento de ancoragem, em mm;
- $f_{w,k}$ Valor característico da resistência ao arranque do ligador, em N/mm^2 ;
- d Diâmetro do ligador, em mm.

Para a determinação do valor característico da resistência ao arranque do ligador precisa-se de conhecer o material e o tipo de ligador presente na ligação.

Para as seguintes expressões considera-se:

- α Ângulo entre a direção do fio com a direção do fio da face do elemento, em graus;
- t_w Comprimento de ancoragem, em mm;

- ρ_k Valor característico da massa volúmica da madeira, em kg/m^3 ;
- d Diâmetro do ligador; em mm;
- d_c Diâmetro do núcleo do parafuso; em mm;
- n_p Número de camadas trespassadas;
- n_{ef} Número efetivo de ligadores.

a. **Prego nervurado ($2,5 \text{ mm} \leq d \leq 6,0 \text{ mm}$):**

Tabela 15- Valor característico da resistência ao arranque dos Prego nervurado (prEN 1995-1-1, 2020).

Madeira maciça, MLC e MLCC	$t_w \geq 6d$ $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$	$f_{w,k} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ (Resinosas)	(4.56)
	$3d \leq t_w \leq 6d$	$f_{w,k} = 2,0 - \left(\frac{t_w}{6d}\right)$	(4.57)
	$t_w < 3d$	$f_{w,k} = 0 \text{ N/mm}^2$	(4.58)
Painéis maciços de madeira (SWP)	Sem pré furação e na face do elemento	$f_{w,k} = 0,117d^{0,6}t_w\rho_k^{0,8}$	(4.59)

b. **Parafusos ($3,5 \text{ mm} \leq d \leq 26 \text{ mm}$ e $0,55d \leq d_1 \leq 0,75d$):**

Tabela 16- Valor característico da resistência ao arranque dos parafusos (prEN 1995-1-1, 2020).

Madeira maciça, MLC e MLCC	$f_{w,k} = f_{w,ref}k_wk_{mat} \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{k_p}$	(4.60)
	$f_{w,ref} = \begin{cases} 8,2d^{-0,33} & \text{para Resinosas} \\ 20d^{-0,33} & \text{para Folhosas} \end{cases}$	(4.61)
	$k_w = \begin{cases} 1,0 & \text{para } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 0,7k_{gap} + \frac{\alpha}{30^\circ}(1 - 0,7k_{gap}) & \text{para } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \end{cases}$	(4.62)
	$k_{gap} = \begin{cases} 0,9 & \text{na espessura do MLCC} \\ 1,0 & \text{outras} \end{cases}$	(4.63)

Tabela 16- Valor característico da resistência ao arranque dos parafusos (Continuação) (prEN 1995-1-1, 2020).

	$k_{mat} = \begin{cases} 1,0 & \text{para madeira, } n_p = 1 \\ 1,10 & \text{para MLCC (face do elemento), } n_p \geq 3 \\ 1,13 & \text{para MLCC (face do elemento), } n_p \geq 5 \end{cases}$		(4.64)
	Para MLCC e $n_p < 4$: $k_p = \begin{cases} 1,10 & \text{para Resinosas e } 15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1,25 - 0,05d & \text{para Resinosas e } 0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ \\ 1,6 & \text{para Folhosas e } 0^\circ \leq \alpha \leq 90 \end{cases}$		(4.65)
Contraplacado	$t_w \geq 2,5d$ $\rho_k \leq 300 \text{ kg/m}^3$	$f_{w,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	(4.66)

c. **Agrafos ($1,5 \text{ mm} \leq d \leq 3,1 \text{ mm}$):**

Tabela 17- Valor característico da resistência ao arranque dos agrafos (prEN 1995-1-1, 2020)

Madeira maciça, MLC e MLCC	$t_w \geq 12d$	$f_{w,k} = \begin{cases} 1,56 \left(\frac{\rho_k}{350} \right) & \text{revestido com resina} \\ 0,78 \left(\frac{\rho_k}{350} \right) & \text{sem revestimento} \end{cases}$	(4.67)
----------------------------	----------------	--	--------

d. **Pregos lisos e sem pré furação ($1,9 \text{ mm} \leq d \leq 8 \text{ mm}$):**

Tabela 18- Valor característico da resistência ao arranque dos pregos lisos (prEN 1995-1-1, 2020)

Madeira maciça, MLC e MLCC	$t_w \geq 12d$	$f_{w,k} = k_{ax} \left(\frac{\rho_k}{350} \right)$ $k_{ax} = 0,78$	(4.68)
LVL e GLVL (Bordo do elemento)		$f_{w,k} = k_{ax} \left(\frac{\rho_k}{350} \right)$ $k_{ax} = 0,10d + 0,258 \text{ com } \rho_k \geq 480 \text{ kg/m}^3$	(4.69)
LVL e GLVL (face do elemento)		$f_{w,k} = k_{ax} \left(\frac{\rho_k}{350} \right) \text{ N/mm}^2$ $k_{ax} = 0,78$	(4.70)

Por fim, o valor característico da resistência à tração do ligador ($F_{t,k}$) calcula-se de acordo com a expressão (4.71).

$$F_{t,k} = 0,9 \frac{\pi d^2}{4} f_{u,k} \quad (4.71)$$

Com:

$f_{u,k}$ Valor característico da tensão última do aço, em N/mm^2 , presente na tabela 19;

d Diâmetro do ligador, em mm.

Tabela 19 - Valores característicos da resistência à tração do ligador metálico (prEN 1995-1-1, 2020).

Ligador	Diâmetro	Classe de resistência ou material	$f_{u,k}$
Cavilha	$d = d$	S235	360
		S275	430
		S355	510
Parafuso ou haste roscada	$d = d_{sp}$	3.6	300
		4.6 ou 4.8	400
		5.6 ou 5.8	500
		8.8	800
Parafuso de enroscar	$d = d_1$	Aço carbonizado sem endurecimento	450
		Aço carbonizado endurecido	800
		Aço inoxidável	500
Agrafo	$d = d$		900
Pregos	$d = d$		600

4.2.3 Dimensionamento da ligação

Para se repartir, uniformemente, a força de uma ligação, recorre-se à utilização de vários ligadores. O efeito gerado pelo uso de mais do que um ligador influencia o desempenho da ligação devido à acumulação de tensões resultantes de cada um deles no elemento estrutural (Hilário, 2013). Desta maneira, no dimensionamento da ligação deve-se garantir que se encontram os ligadores necessários e que os seus espaçamentos mínimos são respeitados, com a finalidade de alcançar a resistência máxima da ligação.

O número efetivo de ligadores tem como objetivo estabelecer uma igualdade entre a capacidade total da ligação e a soma da capacidade resistente de cada conector. O cálculo deste parâmetro não sofreu grandes modificações com a revisão do EC5.

4.2.3.1 Ligadores solicitados por uma carga axial e lateral

Para os ligadores que se encontram solicitados por duas cargas, uma axial e outra lateral, a expressão para a sua verificação de segurança apresenta uma ligeira modificação, no que diz respeito aos expoentes da equação. Com a revisão do EC5, o valor do expoente depende do tipo de ligador. Assim, de acordo com a equação (4.72) e a tabela 20, verifica-se a segurança dos ligadores solicitados axialmente e lateralmente.

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^a \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^a \leq 1,0 \quad (4.72)$$

Com:

$F_{ax,Ed}$; $F_{v,Ed}$ Valores de cálculo do esforço axial e do esforço lateral, respetivamente, em N;

$F_{ax,Rd}$; $F_{v,Rd}$ Valores de cálculo das capacidades resistentes da ligação solicitada por um esforço axial e um esforço lateral, respetivamente, em N;

a Valores apresentados na tabela 20.

Tabela 20 - Valores para o expoente da equação (prEN 1995-1-1, 2020).

Ligador	Expoente (a)	Modo de rotura
Pregos lisos	1,0	-
Hastes coladas	1,0	-
Parafusos	1,0	Modo (a) e (b) – sem rótula plástica
	1,5	Modo (d) e (e) – uma rótula plástica
	2,0	Modo (f) – duas rótula plástica
Outros ligadores	2,0	-

4.2.3.2 Espaçamentos mínimos

De acordo com um estudo europeu realizado no âmbito da *COST Action FP1402*, concluiu-se que os espaçamentos mínimos, que se encontram dependentes dos ângulos entre a força e o fio da madeira, provocavam alguma confusão aos projetistas, dificultando as suas decisões finais. Assim sendo, os espaçamentos paralelos e perpendiculares à direção do fio não se apresentam mais com valores fixos, mas sim, valores flexíveis, oferecendo aos projetistas a decisão de modelar a ligação de acordo com a sua necessidade e secção disponível. Em suma, é agora permitida a organização dos ligadores, sendo possível diminuir a sua distância numa determinada direção desde que se compense com o seu aumento noutra direção.

Por vezes, algumas ligações executam-se através da introdução dos ligadores com uma determinada inclinação em relação ao fio da madeira. No entanto, os espaçamentos mínimos para este tipo de ligações não se encontravam discriminados na atual versão do EC5. Assim, uma das novidades da nova proposta diz respeito aos requisitos necessários para o dimensionamento de uma ligação com os ligadores inclinados (ver tabela 21 e ver as figuras 24 e 25).

Tabela 21 - Espaçamentos mínimos recomendados para parafusos solicitados axialmente e inclinados (prEN 1995-1-1, 2020).

	Espaçamento mínimo no plano paralelo ao fio	Espaçamento mínimo no plano perpendicular ao fio	Espaçamento mínimo entre o centro de gravidade do ligador e a extremidade do elemento	Espaçamento mínimo entre o centro de gravidade do ligador e a borda do elemento
	a_1	a_2	$a_{3,CG}$	$a_{4,CG}$
Sem pré furação ($d \leq 12$ mm)				
Madeira maciça	7d	5d	10d	4d
LVL ou GLVL (face)				
LVL-C ou GLVL-C (Borda)	10d		12d	
LVL-C ou GLVL-C inserido na face com penetração da ponta superior a 10d	7d		10d	
LVL-C ou GLVL-C inserido na face com penetração da ponta inferior a 10d	7d		10d	
Pré furado				
LVL e GLV (face e borda)	7d	5d	10d	4d

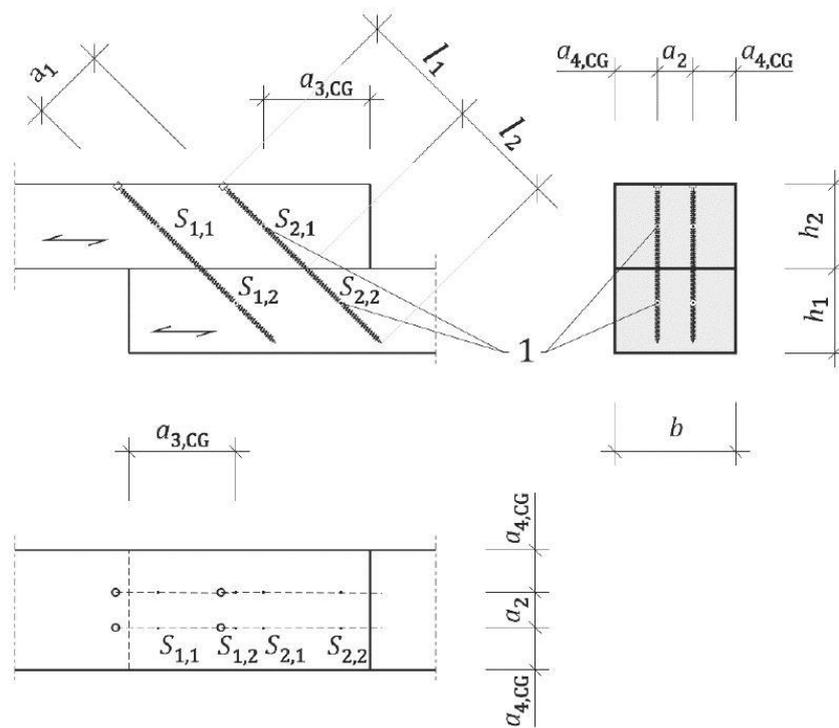


Figura 24 - Ligadores inclinados na direção do fio (prEN 1995-1-1, 2020).

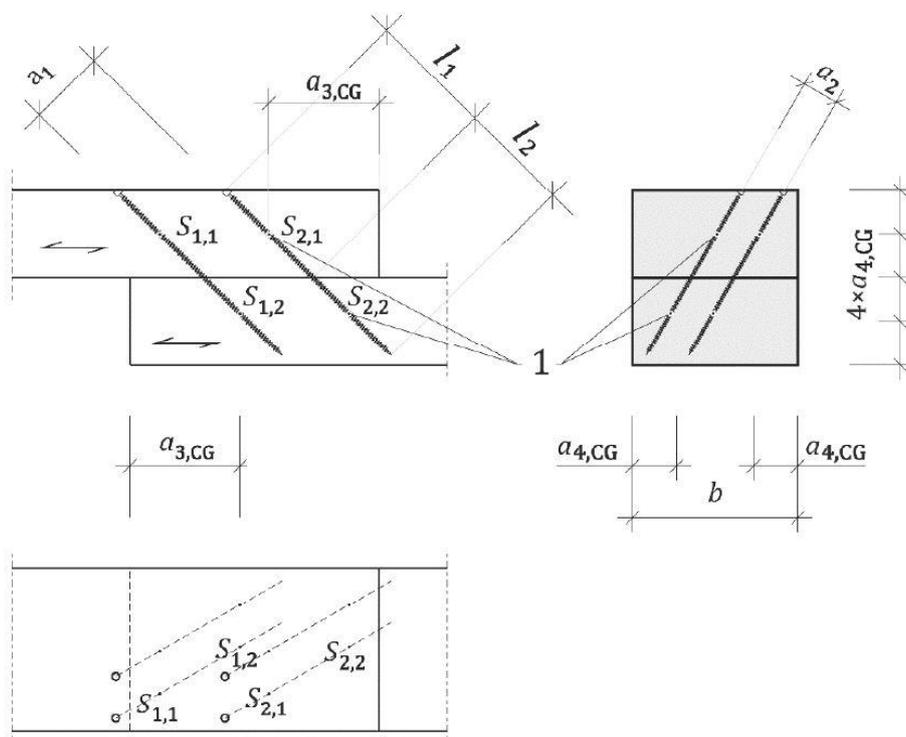


Figura 25 - Ligadores inclinados em duas direções (prEN 1995-1-1, 2020)

4.2.4 Modos de rotura frágil para um grupo de ligadores paralelos ao fio

Os modos de rotura, apresentados anteriormente, assumem que a ligação cede por esmagamento da madeira ou pela plastificação do ligador, antes que ocorra a separação das fibras da madeira ou a rotura da secção.

Quando não é possível cumprir os valores recomendados para os espaçamentos mínimos da ligação, há o risco de suceder uma rotura frágil, prematura, sem que seja atingido a capacidade resistente dos ligadores existentes na ligação. Assim, conclui-se que não é suficiente verificar a capacidade resistente individual dos ligadores, mas também é necessário avaliar a ligação enquanto conjunto (de ligadores).

Conhecem-se quatro tipos de rotura frágil para um grupo de ligadores (figura 26): a) a separação do fio da madeira; b) a rotura em fila de ligadores; c) a rotura em bloco; e d) a rotura por tração.

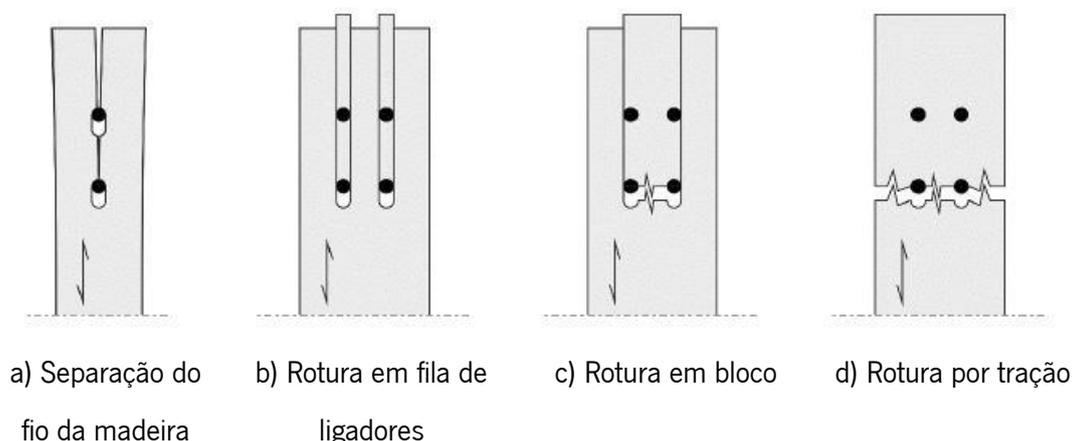


Figura 26 - Modos de rotura em grupo (prEN 1995-1-1, 2020).

Por um lado, é possível verificar-se a segurança aos modos de rotura frágil de um grupo de ligadores, de uma forma simplificada, contudo, deve-se garantir que o modo de rotura (f) do EYM (ver figura 18 e 19), calculado de acordo com a expressão (4.4), prevaleça na ligação e que determinados espaçamentos e distâncias mínimas ($a_1, a_2, a_{3,i}$) se encontram majorados pelo fator de correção (k_{br}).

O fator de correção (k_{br}) depende se os ligadores penetram a totalidade ou só uma parte do elemento de madeira da secção.

- Penetração total do elemento de madeira:

$$k_{br} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ (1 + k_{T,2})k_{pos}n_{col}^{0,5}n_{row}^{0,3}d^{-0,2} \end{array} \right. \quad (4.73)$$

$$k_{pos} = \begin{cases} 0,65 & \text{para membros exteriores} \\ 1,10 & \text{para membros interiores} \end{cases} \quad (4.74)$$

Com:

- $n_{col}; n_{row}$ Número de linhas e colunas de ligadores;
- k_{pos} Fator que considera a posição do elemento de madeira;
- k_{br} Fator de correção dos espaçamentos mínimos a_1 , a_2 e $a_{3,t}$;
- d Diâmetro do ligador, em mm;
- $k_{T,2}$ Fator de limitação do efeito de corda, ver tabela 9.

– Penetração parcial do elemento de madeira:

$$k_{br} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ (1 + k_{T,2}) n_{col}^{0,3} n_{row}^{-0,2} d^{-0,4} \end{array} \right. \quad (4.75)$$

Com:

- $n_{col}; n_{row}$ Número de linhas e colunas de ligadores;
- k_{br} Fator de correção dos espaçamentos mínimos a_1 , a_2 e $a_{3,t}$;
- d Diâmetro do ligador, em mm;
- $k_{T,2}$ Fator de limitação do efeito de corda, ver tabela 9.

4.2.4.1 Rotura em fila dos ligadores

A expressão de cálculo da rotura em fila dos ligadores ($F_{rs,d}$) baseia-se num modelo presente numa norma canadiana, onde as principais diferenças encontram-se na espessura efetiva (t_{eff}) e na resistência ao deslizamento por plano de corte ($F_{v,l,d}$), presente na expressão (4.77).

É importante referir que, este modo de rotura não se encontra presente no EC5.

$$F_{rs,d} = 2n_{row}F_{v,l,d} \quad (4.76)$$

Com:

- n_{row} Número de linhas dos ligadores paralelos ao fio da madeira;
- $F_{v,l,d}$ Valor de cálculo da resistência ao deslizamento por plano de corte no elemento de madeira, em N.

A expressão (4.77) reformulou-se com a finalidade de abranger diferentes materiais, através do parâmetro k_v . No anexo A do EC5 considerava-se um valor fixo para este fator, tendo em conta a distribuição desigual da carga entre os ligadores em linha. Com a revisão do documento, o valor do parâmetro k_v depende do módulo de elasticidade e do módulo de distorção da madeira, calculam-se de acordo com a expressão (4.79).

$$F_{v,l,d} = k_v t_{ef} L_c f_{v,d} \quad (4.77)$$

$$L_c = a_1 (n_{col} - 1) + a_{3,t} \quad (4.78)$$

$$k_v = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{G_{mean}}{E_{0,mean}}} \quad (4.79)$$

Com:

- k_v Fator que considera os diferentes materiais;
- t_{ef} Espessura efetiva obtida através da equação (4.87), em mm;
- $f_{v,d}$ Valor de cálculo da força de deslizamento da madeira;
- L_c Comprimento de ligação paralelo ao fio, em mm;
- G_{mean} Módulo de distorção da madeira, em N/mm²;
- $E_{0,mean}$ Módulo de elasticidade da madeira, em N/mm²;
- n_{col} Número de colunas de ligadores paralelas ao fio;
- a_1 Espaçamento paralelo ao fio, em mm;
- $a_{3,t}$ Distância à extremidade solicitada, em mm.

4.2.4.2 Rotura em bloco

A rotura em bloco (ver figura 27) também não se encontra no EC5 e, como o caso da rotura em fila dos ligadores, também se encontra associado à norma canadiana, apresentando as mesmas diferenças. Para tal, as expressões (4.77) e (4.84) dizem respeito ao cálculo da resistência ao deslizamento por plano de corte ($F_{v,l,d}$) e à resistência à tração paralela ao fio ($F_{t,Rd}$), respetivamente.

$$F_{bs,d} = 2F_{v,l,d} + F_{t,d} \quad (4.80)$$

Com:

$F_{v,l,d}$ Valor de cálculo da resistência ao deslizamento por plano de corte no elemento de madeira, em N;

$F_{t,d}$ Valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio de madeira, ver expressão (4.84), em N.

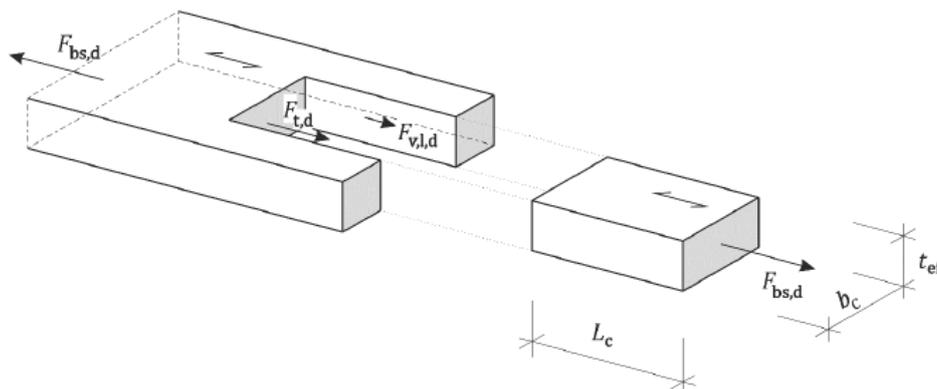


Figura 27 - Representação das forças do modo de rotura em bloco. (prEN 1995-1-1, 2020).

No caso em que o ligador não penetre por completo a secção do elemento de madeira, apenas ocorre a rotura parcial do bloco (ver figura 28). Assim, recorre-se à expressão (4.81) para determinar o seu valor. Esta fórmula baseia-se no modelo presente no EC5, porém, este modo de rotura não se calcula através da soma dos diferentes planos de corte, mas sim, através do máximo entre a resistência ao deslizamento por plano de corte ($F_{v,l,d}$) ou da soma do valor da resistência ao deslizamento da parte inferior ($F_{v,b,Rd}$) com a resistência dos planos de tração ($F_{t,d}$).

$$F_{ps,d} = \max \left\{ \begin{array}{l} k_f F_{v,l,d} \\ k_f (F_{v,b,Rd} + F_{t,d}) \end{array} \right. \quad (4.81)$$

$$k_f = \begin{cases} 0,90 & \text{para pregos} \\ 1,10 & \text{para parafusos} \end{cases} \quad (4.82)$$

Com:

k_f Fator que depende do tipo de ligador;

$F_{v,b,Rd}$ Valor de cálculo da resistência ao deslizamento por plano de corte da parte inferior do elemento de madeira, em N, presente na expressão (4.83);

$F_{t,Rd}$ Valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio de madeira, em N, presente na expressão (4.84).

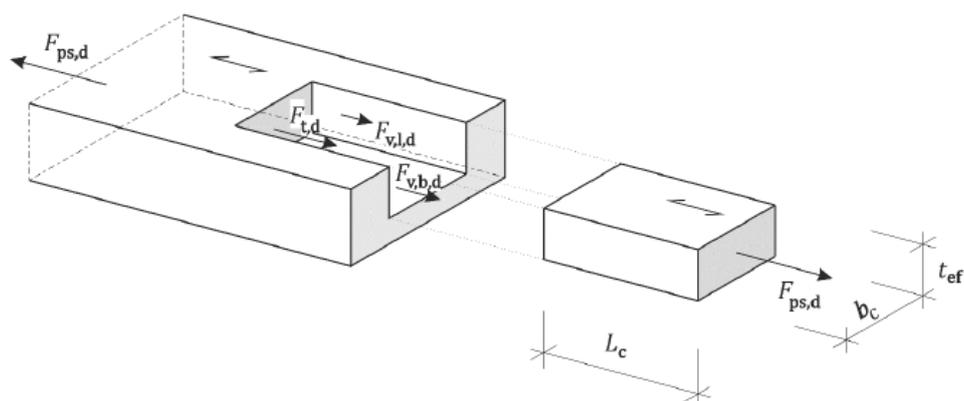


Figura 28 - Ruptura da parte superior do bloco (prEN 1995-1-1, 2020).

$$F_{v,b,Rd} = k_v b_{net} L_c f_{v,d} \quad (4.83)$$

Com:

- k_v Fator que considera os diferentes materiais;
- b_{net} Distância entre os ligadores perpendicular ao fio, em mm.
- L_c Comprimento de ligação paralelo ao fio, em mm;
- $f_{v,d}$ Valor de cálculo da força de deslizamento da madeira;

$$F_{t,Rd} = k_t t_{ef} b_{net} f_{t,0,d} \quad (4.84)$$

$$k_t = 0,9 + 1,4 \sqrt{\frac{G_{mean}}{E_{0,mean}}} \quad (4.85)$$

$$b_{net} = (a_2 - d_0)(n_{row} - 1) \quad (4.86)$$

Com:

- k_t Fator que considera uma distribuição da carga mais homogénea;
- b_{net} Área partida na ruptura em bloco, em mm²;
- t_{ef} Espessura efetiva para a penetração parcial dos ligadores, equação (4.87), em mm;
- $f_{t,0,d}$ Valor de cálculo da força de tração da madeira paralela ao fio, em N/mm²;
- G_{mean} Módulo de distorção da madeira, em N/mm²;
- $E_{0,mean}$ Módulo de elasticidade da madeira, em N/mm²;
- n_{row} Número de filas paralelas ao fio;
- a_2 Espaçamento perpendicular ao fio, em mm;

d_0 Maior valor do diâmetro entre a pré furação ou ligador, em mm.

4.2.4.3 Espessura efetiva

A espessura efetiva ($t_{ef,ps}$) depende de vários fatores, tais como, do membro de madeira, como exterior ou interior, e se ocorreu pré furação para a introdução dos ligadores. Estes fatores são todos considerados na expressão (4.87).

O processo de cálculo encontra-se diferente do apresentado no Anexo A do EC5, uma vez que se considera duas possibilidades de rotura frágil, uma antes da cedência do ligador (comprimento elástico) e outra depois da cedência (comprimento plástico). A espessura efetiva elástica ($t_{ef,el}$) obteve-se através do ensaio de uma viga num modelo de fundação elástica, por outro lado, a espessura efetiva plástica ($t_{ef,pl}$) considera a origem de um modo de rotura com duas rótulas e a contribuição elástica da parte não cedida.

$$t_{ef,ps} = \min \begin{cases} t_{ef,el} \\ t_{ef,pl} \end{cases} \quad (4.87)$$

Com:

$t_{ef,el}$ Espessura efetiva elástica, em mm;

$t_{ef,pl}$ Espessura efetiva plástica, em mm;

– Espessura efetiva elástica

A espessura efetiva elástica ($t_{ef,el}$) depende dos planos de corte do membro onde ocorre a rotura. Se ocorrer no membro interior, utiliza-se a equação (4.88), no entanto, se ocorrer no membro exterior, utiliza-se a equação (4.91).

Por fim, se existirem vários membros interiores, o valor final da equação (4.88) deve ser multiplicado por 0,85.

$$t_{ef,el} = \begin{cases} t_{h,i} & \text{se } \frac{t_{h,i}}{d} \leq 11a_{cl} \\ \max \left\{ \begin{array}{l} \left(2 - \frac{t_{h,i}}{11d}\right) a_{cl} t_{h,i} \\ 0,65 a_{cl} t_{h,i} \end{array} \right. & \text{se } \frac{t_{h,i}}{d} > 11a_{cl} \end{cases} \quad (4.88)$$

Com:

$$a_{cl} = \begin{cases} 0,65 & \text{para uma ligação madeira-madeira e o modo de rotura (f) prevalece} \\ 1,0 & \text{para uma ligação aço-madeira e o modo de rotura (f) prevalece} \end{cases} \quad (4.89)$$

$$t_{h,i} = t_{h,pl} = t_h - \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{df_{h,0,k}}} \quad (4.90)$$

$t_{h,i}$ Comprimento de penetração do ligador no membro interior, em mm;

d Diâmetro do ligador, em mm;

a_{cl} Fator relacionado com a fixação do ligador;

$M_{y,Rk}$ Valor característico do momento de cedência plástica do ligador, em Nmm;

$f_{h,0,k}$ Valor característico da capacidade resistente ao esmagamento localizado da madeira, em N/mm²;

t_h Comprimento de penetração do ligador, em mm.

$$t_{ef,el} = \begin{cases} a_{cl}t_{h,0} & \text{se } \frac{t_{h,0}}{d} \leq 3 \\ \max \left\{ \left(1,17 - \frac{t_{h,0}}{18d}\right) a_{cl}L_{p,0} \right. \\ \left. 0,35a_{cl}t_{h,0} \right\} & \text{se } \frac{t_{h,0}}{d} > 3 \end{cases} \quad (4.91)$$

Com:

$$a_{cl} = \begin{cases} 0,65 & \text{numa ligação madeira-madeira e todos os modos de rotura, exceto no modo (f)} \\ 1,0 & \text{numa ligação aço-madeira e o modo de rotura (f) prevalece} \end{cases} \quad (4.92)$$

$$t_{h,0} = t_{h,pl}$$

$t_{h,0}$ Comprimento de penetração do ligador no membro exterior, no caso de se tratar de uma penetração parcial, corresponde ao comprimento do ligador, em mm;

d Diâmetro do ligador, em mm;

a_{cl} Fator relacionado com a fixação do ligador;

– Espessura efetiva plástica

O cálculo da espessura efetiva plástica ($t_{ef,pl}$) depende se ocorreu pré furação, equação (4.93), ou se não ocorre pré furação, equação (4.94).

$$t_{ef,pl} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{2df_{h,0,k}}} - t_{ef,el,2} \quad (4.93)$$

Com:

$t_{ef,el,2}$ Espessura efetiva elástica predominante, em mm.

$f_{h,0,k}$ Valor característico da capacidade resistente ao esmagamento localizado da madeira, em N/mm²;

$M_{y,Rk}$ Momento de cedência plástica do ligador, em Nmm;

$$t_{ef,pl} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{2df_{h,0,k}}} + \frac{t_h}{2} \quad (4.94)$$

Com:

$M_{y,Rk}$ Momento de cedência plástica do ligador, em Nmm;

$f_{h,0,k}$ Valor característico da capacidade resistente ao esmagamento localizado da madeira, em N/mm²;

t_h Comprimento de penetração do ligador, em mm;

d Diâmetro do ligador, em mm.

4.2.5 Modo de rotura frágil para um grupo de ligadores perpendicular ao fio

A base de cálculo deste modo de rotura manteve-se igual à presente no EC5, porém realizaram-se algumas modificações, a fim de melhorar os resultados obtidos. De acordo com os estudos realizados o valor do fator de fratura (k_G), presente na expressão do EC5, subdimensiona a capacidade de carga da ligação, com isto, realizou-se a sua modificação passando a depender do valor característico da massa volúmica da madeira (ρ_k) presente na ligação. Assim, o método de cálculo apenas se alterou na determinação do valor característico da capacidade resistente de fendimento ($F_{sp,Rk}$).

$$F_{sp,Rk} = \frac{k_{mod}}{\gamma_R} k_{red,1} k_G b_{ef} \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad (4.95)$$

Com:

$$k_{red,1} = \begin{cases} 0,6 & \text{para madeira maciça} \\ 0,8 & \text{para MLC} \\ 1,0 & \text{para LVL-P} \end{cases} \quad (4.96)$$

$$k_G = (0,05\rho_k + 2) \quad (4.97)$$

$$b_{ef} = \begin{cases} \min \left\{ \begin{array}{l} 6d \\ b \end{array} \right. & \text{para varões colados} \\ b & \text{outros ligadores} \end{cases} \quad (4.98)$$

Com:

$F_{90,Rk}$ Valor característico da capacidade resistente de fendimento, em N;

k_{mod} Fator de correção para a duração das ações e para o teor em água;

γ_R Fator parcial de resistência, ver tabela 22;

ρ_k Valor característico da massa volúmica da madeira, em kg/m³;

h_e Distância entre o bordo solicitado até à zona onde toda a força da conexão é transmitida, no caso parafusos autorroscante é o comprimento de penetração sem o comprimento da ponta, mm;

h Altura do elemento, em mm;

k_G Fator de fratura;

k_d Fator que tem em consideração a geometria do elemento;

$k_{red,1}$ Fator de redução;

b_{ef} Largura efetiva do elemento, em mm;

b Espessura do ligador, em mm;

d Diâmetro do ligador, em mm;

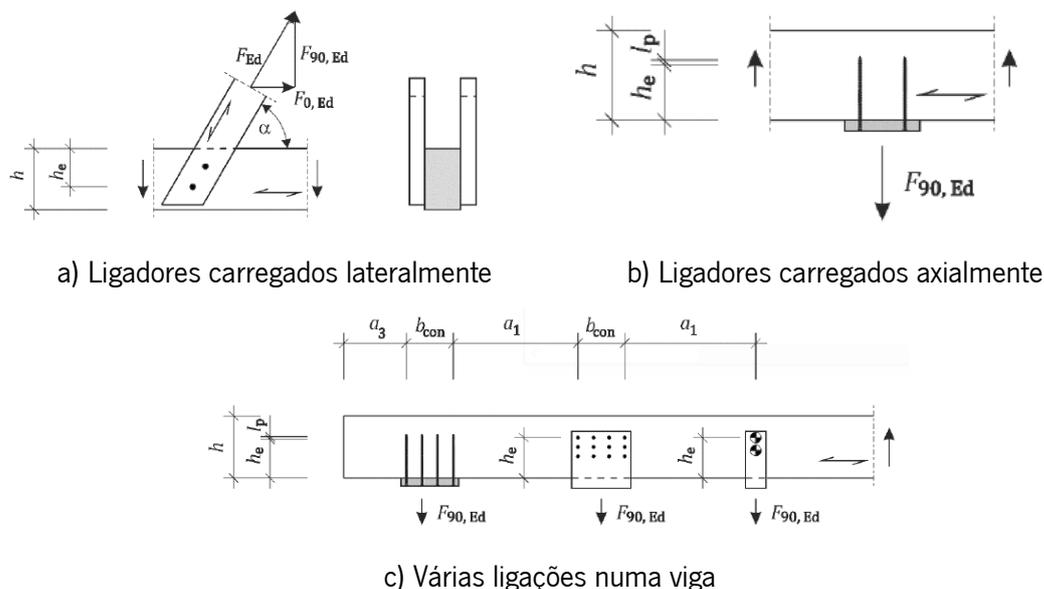
Tabela 22 – Valores do fator parcial de resistência γ_R (Adaptado prEN 1995-1-1, 2020).

Material		Norma	Fator parcial de resistência
Ligadores do Tipo Cavilha	Geral	EN 14592	$\gamma_R=1,3$
	Modo de rotura dúctil		$\gamma_R=t.b.d$
Ligadores		EN 14545	$\gamma_R=1,3$

Tabela 22 – Valores do fator parcial de resistência γ_R (Continuação) (Adaptado *prEN 1995-1-1, 2020*).

Material		Norma	Fator parcial de resistência
Placas metálicas perfuradas	Força de ancoragem	EN 14545	$\gamma_R=1,3$
	Força na placa de aço		$\gamma_R=1,1$
Situações Acidentais – Todos os materiais e ligadores			$\gamma_R=1,0$

Na figura 29 apresentam-se as várias formas que os ligadores podem ser solicitados quando se pretende determinar a componente da força perpendicular ao fio, para além das várias especificações e parâmetros necessários.



Legenda:

h - Largura da viga, em mm;
 h_e - Distância entre o bordo solicitado até à zona onde toda a força da conexão é transmitida, no caso parafusos autorroscante é o comprimento de penetração sem o comprimento da ponta, mm;

l_p - Comprimento da ponta dos parafusos autorroscante, em mm;

a_1 - Menor distância entre os ligadores de duas ligações, em mm;
 a_3 - Distância entre o bordo e o ligador mais próximo, em mm;
 b_{con} - Largura da ligação, em mm;
 $F_{90,Ed}$ - Valor de cálculo da força perpendicular ao fio, em N.

Figura 29 – Ações nos ligadores para a determinação da componente da força perpendicular ao fio (prEN 1995-1-1, 2020).

O cálculo da resistência ao fendimento ($F_{sp,Rk}$) pode ser desprezado se a expressão (4.99) se verificar.

$$\frac{h_e}{h} \geq 0,7 \quad (4.99)$$

Com:

h_e Distância entre o bordo solicitado até à zona onde toda a força da conexão é transmitida, no caso parafusos autorroscante é o comprimento de penetração sem o comprimento da ponta, mm;

h Altura do elemento, em mm.

Por outro lado, para uma ligação múltipla (ver figura 29c) o valor obtido para a resistência ao fendimento ($F_{sp,Rk}$), a partir da expressão (4.95), deve ser multiplicado pelo fator de modificação ($k_{n,1}$), determina na seguinte expressão.

$$k_{n,1} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1,0}{n}} & \text{para } 2h \leq a_1 \leq 6h \\ 1,0 & \text{para } a_1 \geq 8h \text{ e } a_1 < h \end{cases} \quad (4.100)$$

Com:

n Número de ligadores;

h Altura do elemento, em mm;

a_1 Menor distância entre os ligadores de duas ligações, em mm;

Para distâncias entre $6h < a_1 < 2h$ e $6h < a_1 < 8h$ realiza-se uma interpolação para determinar o valor do fator de modificação ($k_{n,1}$).

Por fim, para as ligações que apresentem uma distância ao bordo do elemento com $a_3 < h_e$, o valor da resistência ao fendimento ($F_{sp,Rk}$), obtido a partir da equação (4.95), deve ser reduzido 50%.

4.3 Cavilhas de madeira

Nas estruturas correntes, as ligações mais comuns entre elementos de madeira são realizadas através de chapas metálicas e ligadores metálicos do tipo cavilha sujeitos ao corte. As vantagens deste tipo e ligação são a facilidade de dimensionamento, execução e montagem, bem como a sua elevada capacidade de carga e ductilidade (Palma et al., 2014).

No entanto, uma desvantagem deste tipo de ligadores encontra-se quando se utilizam em ambientes quimicamente mais agressivos, ou quando se requer materiais que não sejam magnéticos ou não condutores, uma vez que a condução do calor, através dos ligadores metálicos, para o interior da madeira compromete a sua resistência ao fogo.

Deste modo, surge a necessidade de se implementar uma ligação não metálica com ligadores do tipo cavilha. A solução para este problema encontrou-se nas cavilhas de madeira, que, tal como as ligações com elementos metálicos, apresenta uma resistência ao corte e as mesmas vantagens de fabricação e montagem em obra, porém, as cavilhas de madeira podem ser utilizadas em ambientes mais agressivos. O único obstáculo ocorreu na inexistência de regulamentação que permitisse determinar a contribuição do efeito cavilha desta ligação.

Como resposta a esta situação, a revisão do Eurocódigo 5 contempla ligações com o recurso a cavilhas de madeira, porém, considera-se que as mesmas são de madeira de Folhosas.

Para se determinar a contribuição do efeito cavilha ($F_{D,k}$) de uma cavilha de madeira, em primeiro lugar, deve-se verificar se os seguintes requisitos se cumprem em relação à cavilha utilizada e aos elementos de madeira, presentes na ligação:

- A cavilha provém da madeira de Faia ou Carvalho (D30);
- A cavilha apresenta uma seção hexagonal ou redonda;
- O diâmetro encontra-se entre 12 mm a 30 mm;
- Os elementos de madeira são constituídos por madeira maciça (C24 ou superior);
- A espessura dos elementos de madeira é superior ou igual a duas vezes o diâmetro da cavilha.

Uma vez que estes requisitos se encontram averiguados, a contribuição do efeito cavilha ($F_{D,k}$) determina-se de acordo com a expressão (4.101). Por fim, para se obter a resistência lateral de uma ligação por ligador e por plano de corte ($F_{v,d}$) desta ligação deve-se recorrer à expressão (4.3).

$$F_{D,k} = 14d^{1,8} \tag{4.101}$$

Com:

d Diâmetro da cavilha de madeira, em mm.

4.4 Dimensionamento de ligadores planos

O dimensionamento dos ligadores planos permanece igual ao que se encontra no EC5. Na EN^o912 (2011) encontra-se as informações relativas às características geométricas e ao tipo de materiais que podem ser utilizados na produção destes ligadores.

Em primeiro lugar, os anéis (ver figura 30a) manifestam-se com a forma circular, podendo ser fechados ou abertos, formando um grupo de seis tipos, designados de A1 até A6. Utilizam-se nas ligações madeira-madeira em conjunto com um parafuso de porca ou autorroscante, com o intuito que, o anel se incorpore nos elementos de madeira. A transmissão dos esforços neste tipo de ligações ocorre do elemento de madeira até ao anel, por pressão diametral, sucedendo a esforços de corte no parafuso, voltando a transmitir os esforços para o outro elemento através da pressão diametral.

Seguidamente, as placas circulares (ver figura 30b) são similares aos anéis, porém, apenas se encontram divididas em quatro tipos, da B1 a B4. As suas ligações podem ocorrer entre madeira-madeira, madeira-aço e até madeira-betão, contudo, precisa-se de colocar uma placa em cada elemento. Para estes ligadores também se recorre a um parafuso, que passa no centro das placas, mas a sua função encontra-se relacionada com a transmissão de esforços entre os elementos da ligação. Os elementos transmitem os esforços à placa, que, por sua vez, transmite o esforço de corte ao parafuso, encaminhando a força até à outra placa do elemento.

Por fim, as placas dentadas (ver figura 30c) dividem-se em onze tipos, da C1 a C11. A ligação também se realiza com o recurso a um parafuso que atravessa a zona central. A cravação da placa nos elementos realiza-se através de uma força de compressão. As suas ligações podem ocorrer entre madeira-madeira, madeira-aço e madeira-betão. A transmissão de esforços ocorre desde o elemento até aos dentes da placa, cravados no mesmo, passado para o parafuso, até alcançar os dentes cravados no outro elemento. Nestas ligações o parafuso apresenta um papel fulcral, na medida em que, a ocorrência de deslizamentos na zona de cravação, torna o parafuso como o principal meio de transmissão de esforços, assim a resistência da ligação obtém-se através do somatório da resistência da placa e do parafuso central.

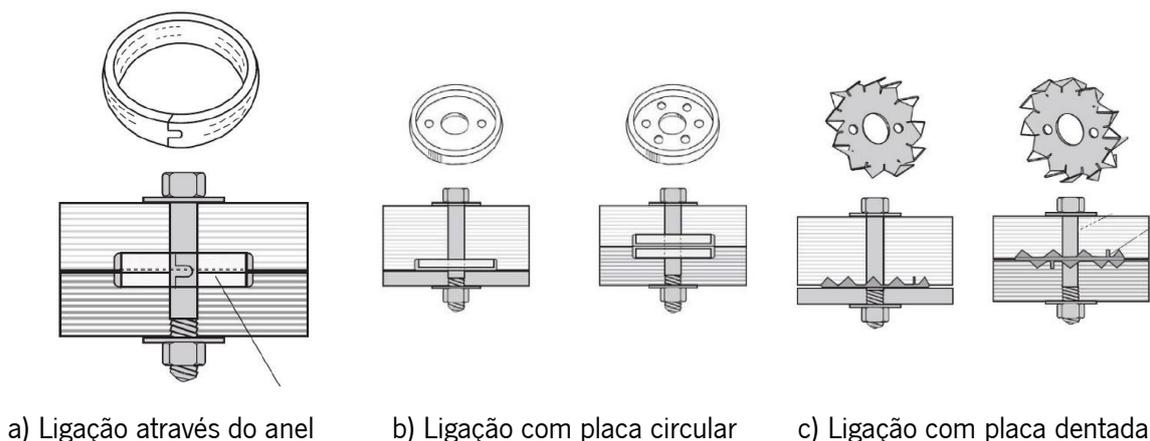


Figura 30 – Ligadores planos (Porteous & Kermani, 2007).

4.5 Tubo de aço com reforço DWV

Os elementos de madeira ligados através de um tubo de aço reforçado com DWV (*Densified Veneer Wood*) apresentam, não só, uma boa resistência, rigidez e ductilidade, mas também, uma excelente resposta em situações sísmicas.

Esta ligação inicia-se pela pré furação exata dos elementos de madeira, de seguida, reforça-se a lateral do orifício através de folhas de madeira densificadas, designadas por DWV, e introduz-se o tubo de aço no orifício até as folgas desapareçam.

Deve-se aplicar apenas em estruturas de madeira em classe de serviço 1 e 2 e não se destinam a todos os materiais, apenas à MLC, LVL e madeira maciça.

4.5.1 Especificações do tubo de aço

Os tubos de aço devem apresentar-se com os valores do seu comprimento (l), diâmetro (d) e espessura da parede (t) conhecidos através das especificações do fabricante (figura 31). Por outro lado, na tabela 23 apresentam-se outros requisitos importantes, que se devem conhecer para uma escolha correta do tubo de aço.

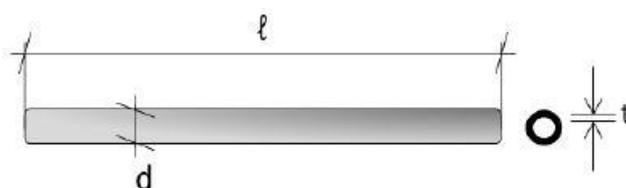


Figura 31 – Especificação das dimensões do tubo de aço (prEN 1995-1-1, 2020).

Tabela 23 - Requisitos mínimos para os tubos de aço (prEN 1995-1-1, 2020).

Diâmetro exterior	Espessura mínima do DWV	Espessura da parede da cavilha	Valor característico da resistência lateral	Módulo de deslizamento
(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(kN/mm)
17,2	12	2,35	35	30
21,3	14	2,65	55	42
26,9	16	2,65	69	55
33,7	18	3,2	96	65

Em relação ao comportamento força/deformação do tubo de aço, facilmente se chega aos seus valores através do gráfico (ver figura 32). A resistência lateral do tubo de aço ($F_{D,Rk}$) obtém-se em função da deformação (w), com a expressão (4.102) e os parâmetros da tabela 24.

$$F_{D,Rk} = \frac{(a - b)w}{\left(1 + \left(\frac{(a - b)w}{c}\right)^e\right)^{1/e}} + bw \quad (4.102)$$

Tabela 24 - Valores para a determinação da resistência lateral do tubo de aço (prEN 1995-1-1, 2020).

Diâmetro do tubo (d)	a	b	c	e	Deformação máxima (w)
18 mm	38	0,99	26	1,26	15 mm
22 mm	55	1,20	42	1,35	18 mm
28 mm	69	1,40	55	1,40	18 mm
35 mm	98	1,97	61	1,38	20 mm

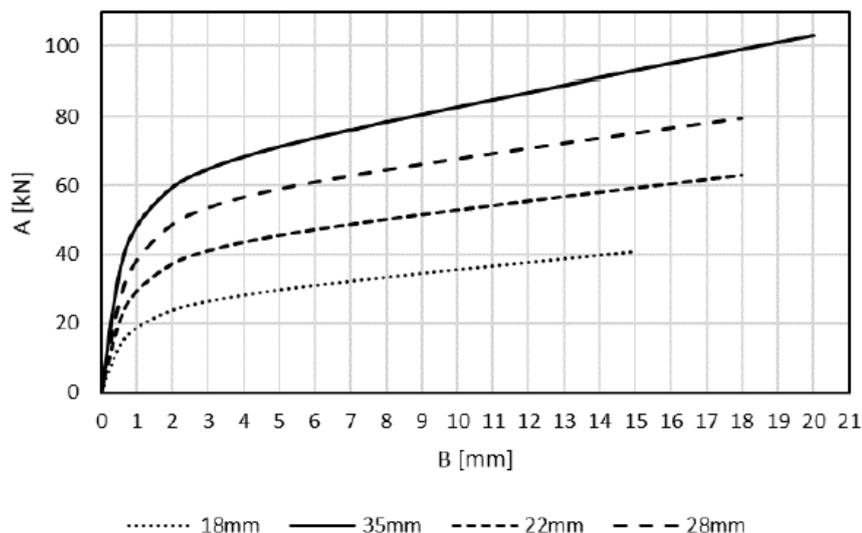


Figura 32 – Relação entre a resistência lateral do tubo de aço (A) e a deformação (B) (prEN 1995-1-1, 2020).

4.5.2 Especificações para o reforço DVW

No dimensionamento das ligações em que as forças atuam paralelamente ao fio da madeira, a tensão de corte (τ_d) que atua ao longo da linha do reforço determina-se segundo a expressão (4.103).

$$\tau_d \leq k_{red} f_{v,d} \quad (4.103)$$

$$k_{red} = 0,5$$

Com:

k_{red} Fator de redução que tem em consideração a distribuição desigual da força de corte, paralela ao fio, ao longo da linha da cola;

$f_{v,d}$ Valor de cálculo da resistência ao corte do elemento da madeira, em N/mm^2 .

No caso das ligações que apresentem um determinado momento fletor, o momento resistente da área do reforço DVW ($M_{dvw,Rd}$) determina-se conforme a expressão (4.104).

$$M_{c,Ed} \leq M_{dvw,Rd} \quad (4.104)$$

$$M_{dvw,Rd} = \frac{b_{dvw} h_{dvw}^2 f_{v,d}}{8} \quad (4.105)$$

Com:

b_{dvw} Corresponde ao comprimento da linha de cola paralela ao fio, em mm;

h_{dvw} Corresponde à largura da linha de cola perpendicular ao fio, em mm;

$f_{v,d}$ Valor da resistência ao corte do elemento da madeira, em N/mm^2 .

No que diz respeito aos espaçamentos mínimos deve-se respeitar uma distância mínima de $3,5d$, em que d corresponde ao diâmetro exterior. Na situação em que ocorra transmissão do momento fletor nestas ligações, a distância mínima deve ser reduzida para $2,5d$.

4.6 Varões colados

Durante o desenvolvimento do EC5 atual, a ligação dos elementos das estruturas de madeira através dos varões colados encontrava-se, presente, no documento como uma solução de ligação, contudo, devido a algumas discussões, discrepâncias e preocupações sobre a ligação, conduziu à sua exclusão da norma europeia.

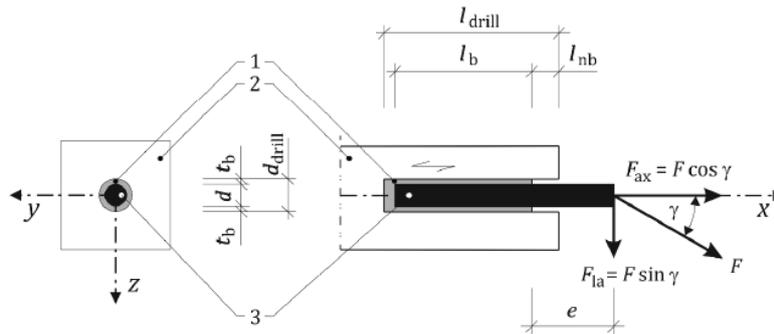
Segundo Martins & Negrão (2018) as ligações madeira-madeira com varões colados são, atualmente, extensivamente utilizadas por grandes empresas europeias de construção em madeira, contudo, continuam por aprovar normas ou regras de dimensionamento comuns a todo o Espaço Económico Europeu, o que tem colocado a pressão do lado da comunidade técnica e científica e levado à intensificação da investigação deste tema. Nesta pesquisa elaborada por Martins & Negrão (2018), concluíram que, o método proposto no *draft* de 2003 do EC5 exibiu-se, do ponto de vista de segurança, o que melhor se ajustava aos resultados experimentais obtidos, uma vez que, encontraram-se resultados moderadamente conservadores.

Com estas questões levantadas em relação a esta ligação, realizaram-se vários testes e estudos, com a finalidade de obter as devidas respostas e perceber melhor o funcionamento e requisitos necessários para a ligação se encontrar normalizada. Deste modo, e aproveitando a revisão do EC5, a ligação por varões colados encontra-se formalizada, com a finalidade de se adicionar como uma opção de ligação das estruturas de madeira.

No caso em que se utilize um conjunto de varões colados a atuar em simultâneo, com uma distribuição uniforme da carga entre eles, deve-se ter em atenção ao aparecimento de uma falha dúctil nos varões. Porém, se esta situação não ocorrer, a resistência da ligação deve ser reduzida consoante o número de varões presentes na ligação, isto é, utiliza-se um fator de redução do grupo, que correspondem os seguintes valores:

- $k_g = 1,0$ para 1 ou 2 varões;
- $k_g = 0,9$ para 3 ou 4 varões;
- $k_g = 0,8$ para 5 ou 6 varões.

É importante referir que, não se deve utilizar mais do que seis varões numa ligação sem distribuição uniforme da carga e, que, se deve preservar no mínimo uma distância de 75 mm entre cada varão, a fim de se minimizar o risco de rutura do elemento de madeira devido ao excesso de concentração de forças nos varões. Na figura 33 representa-se uma ligação com um varão colado.



Legenda:

1- Adesivo;	d_{drill} - Diâmetro do furo;
2- Elemento de madeira;	d- Diâmetro do varão;
3- Varão;	e- Distância entre a linha da cola e o lado solicitado
l_{drill} - Comprimento do furo;	γ - Ângulo entre a força e o eixo;
l_b - Comprimento de fixação;	F- Força aplicada;
l_{nb} - Comprimento livre;	F_{la} - Componente vertical da força;
t_b - Espessura do adesivo;	F_{ax} - Componente axial da força.

Figura 33 – Exemplo e especificação de um varão colado (prEN 1995-1-1, 2020).

Os elementos de madeira, para estas ligações, devem garantir o equilíbrio do teor em água até ao final, na medida em que, os varões inseridos perpendicularmente ao fio da madeira e as variações do teor em água agravam o risco do aparecimento de fendas.

4.6.1 Requisitos dos materiais

Esta ligação pode ser executada em MLC, MLCC, LVL e madeira maciça. Os varões apresentam-se com diâmetros que podem variar dos 6 mm até aos 30 mm, com nervuras ou lisos. Note-se que, a aderência do varão ao adesivo estrutural é a chave de todo o sistema estrutural, devendo evitar-se o uso de varões lisos, a fim de mobilizar, para além da adesão química entre os materiais a ligar, a parcela devida a resistência mecânica originada pela rugosidade da interface (Martins & Negrão, 2018).

A geometria da ligação deve respeitar a condição imposta pela expressão (4.106). O comprimento de fixação (l_b) não deve exceder os 3000 mm, sem ultrapassar o rácio da esbelteza apresentado na expressão (4.107).

$$l_b \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5d^2 \\ 10d \end{array} \right. \quad (4.406)$$

$$\frac{l_b}{d} < 100 \quad (4.107)$$

Com:

l_b Comprimento de fixação, em mm;

d Diâmetro do ligador, em mm.

No que diz respeito ao adesivo, a sua força resistente depende do comprimento de fixação do varão (l_b), podendo variar consoante os valores apresentados na tabela 25.

Tabela 25 – Valores mínimos para a força característica do adesivo, $f_{vr,k}$, em N/mm^2 (prEN 1995-1-1, 2020).

	Comprimento de fixação efetivo, $l_{b,ef}$		
	$l_{b,ef} \leq 250$ mm	250 mm $\leq l_{b,ef} \leq 500$ mm	500 mm $\leq l_{b,ef} \leq 1000$ mm
$f_{vr,k}$	4,0	$5,25 - 0,005l_{b,ef}$	$3,5 - 0,0015l_{b,ef}$

4.6.2 Resistência axial dos varões colados

O valor característico da resistência axial dos varões colados ($F_{ax,Rd}$) determina-se de acordo com a equação (4.108).

$$F_{ax,Rd} = \begin{cases} F_{ax,rod,b} \\ F_{ax,b,d} \end{cases} \quad (4.108)$$

Em que:

$$F_{ax,rod,b} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\gamma_{M,0}} A_s f_{y,k} \\ \frac{1}{\gamma_{M,2}} 0,9 A_s f_{u,k} \end{array} \right. \quad \text{para varões roscados} \quad (4.109)$$

$$F_{ax,rod,b} = \frac{1}{\gamma_{M,0}} A_s f_{y,k} \quad \text{para varões nervurados} \quad (4.110)$$

$$F_{ax,b,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} A_s F_{ax,b,k} \quad (4.111)$$

$$F_{ax,b,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} \pi d l_{b,ef} f_{vr,k} \\ E_s A_s \varepsilon_{u,timber} \end{array} \right. \quad (4.112)$$

$$l_{b,ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} l_b \\ 40d \\ 1000 \end{array} \right. \quad (4.113)$$

Com:

$F_{ax,b,d}$	Valor de cálculo da resistência da linha do adesivo, em N;
$F_{ax,b,k}$	Valor característico da resistência de linha do adesivo, em N;
A_s	Área da tensão nominal para cavilhas roscadas e a área da secção transversal para cavilhas nervuradas, em mm ² ;
$f_{y,k}$	Valor característico da tensão de cedência da cavilha colada, N/mm ² ;
$f_{u,k}$	Valor característico da tensão última da cavilha colada, em N/mm ² ;
d	Diâmetro do varão, em mm;
l_b	Comprimento de fixação, em mm;
$l_{b,ef}$	Comprimento de fixação efetivo, em mm;
$f_{vr,k}$	Valor característico da resistência da linha de ligação, em N/mm ² ;
$\gamma_M; \gamma_{M,0}; \gamma_{M,2}$	Fatores parciais de segurança;
$\varepsilon_{u,timber}$	Valor da extensão da madeira paralela ao fio, para <i>Softwood</i> $\varepsilon_{u,timber} = 2,4\%$

Quando se necessita da ductilidade da ligação para o seu dimensionamento, deve-se garantir que a falha dúctil ocorre no varão, através da equação (4.114), e que, esta se deve manifestar primeiro do que a rotura do adesivo, adjacente ao varão, ou do que qualquer modo de rotura dos elementos de madeira.

$$F_{ax,rod,95\%} < F_{ax,b,k} \quad (4.114)$$

Com:

$F_{ax,rod,95\%}$	Capacidade resistente do varão correspondente ao quantilho 95%, em N;
$F_{ax,b,k}$	Valor característico da resistência de linha do adesivo, em N;

A resistência anterior pode ser alcançada para um determinado grau de resistência do aço, respeitando a expressão (4.115).

$$\frac{F_{ax,b,d}}{\frac{1}{\gamma_{M,0}} A_s f_{y,k}} \geq 1,5 \quad (4.115)$$

Com:

- $F_{ax,b,k}$ Valor característico da resistência de linha do adesivo, em N;
- $f_{y,k}$ Valor característico da tensão de cedência varão colado, em N/mm².
- A_s Área da tensão nominal para os varões colados e a área da secção transversal para varões nervuradas, em mm²;
- $\gamma_{M,0}$ Fator parcial de segurança.

4.6.3 Resistência do elemento de madeira

Os varões colados devem ser uniformemente distribuídos na secção transversal de madeira ou dentro de um grupo de conetores, mantendo o equilíbrio da rigidez entre os varões e a madeira.

O valor da resistência à tração do elemento de madeira ($F_{t,0,Rd}$), para um varão colado paralelo ao fio, determina-se de acordo com a expressão (4.116), com uma área efetiva limitada por $36d^2$. No caso dos quadrados das áreas efetivas se sobrepuserem, estas zonas devem ser desprezadas (figura 34).

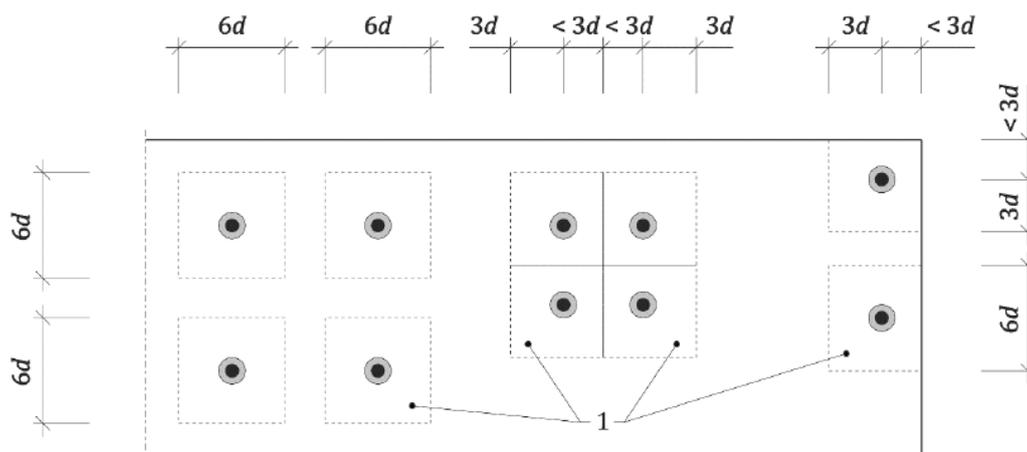
É importante salientar que, no caso do MLCC, a área efetiva não deve exceder mais do que uma lamela.

$$F_{t,0,Rd} \geq F_{t,0,d} A_{ef} \quad (4.116)$$

Com:

$F_{t,0,d}$ Valor de cálculo da resistência à tração da madeira, em N/ mm²;

A_{ef} Área efetiva da madeira, em mm².



Legenda:

- 1) Área efetiva da cavilha colada

Figura 34 - Exemplo das áreas efetivas para a determinação da resistência à tração da madeira (prEN 1995-1-1, 2020).

Para os varões inseridas com um determinado ângulo em relação ao fio, deve-se garantir que pelo menos 70% do comprimento do varão se encontra inserido no elemento de madeira, a fim de evitar a concentração de força na sua ponta. Assim, as áreas efetivas dos varões colados determinam-se de acordo com a figura 35.

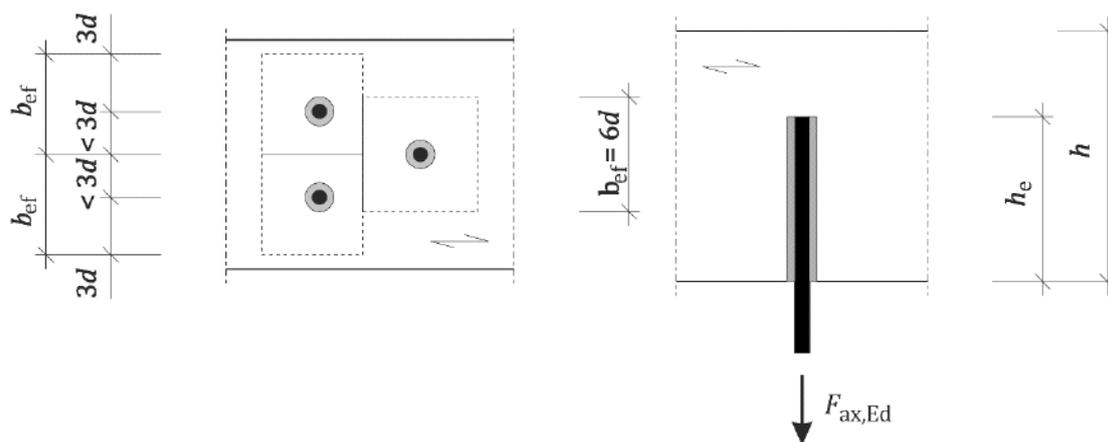


Figura 35 – Área efetiva para cavilhas inseridas com um determinado ângulo ao fio da madeira (prEN 1995-1-1, 2020).

4.6.4 Resistência lateral dos varões colados

Para o cálculo da resistência lateral dos varões colados deve-se considerar a tabela 6 para a determinação força característica ao esmagamento localizado da madeira ($f_{h,k}$), porém, se os varões se encontrarem inseridos na direção perpendicular ao fio da madeira, o valor da resistência deve aumentar 25%, se os varões estiverem inseridos na direção paralela ao fio da madeira, o valor da resistência deve aumentar 10%. Este aumento deve-se ao elevado coeficiente de fricção que acontece nos ligadores, tornando assim, o dimensionamento mais económico.

Quando os varões se introduzem com um determinado ângulo em relação ao fio, recorre-se à equação (4.95) para se verificar a resistência dos elementos de madeira, onde se considera $6d$ como a largura efetiva máxima.

Para as forças que atuam a uma certa distância (e), os modos de rotura da figura 36 devem ser considerados e determinados de acordo com a expressão (4.117).

$$F_{D,k} = \min \begin{cases} df_{h,k} \left(\sqrt{(l_b^2 + 2e)^2 + l_b^2} - l_b - 2e \right) & \text{(a1)} \\ df_{h,k} \left(\sqrt{e^2 + \frac{2M_{y,k}}{df_{h,k}}} - e \right) & \text{(b1)} \end{cases} \quad (4.117)$$

Em que:

- d Diâmetro da cavilha, em mm;
- $f_{h,k}$ Força característica ao esmagamento localizado da madeira, em N/mm² (ver tabela 6);
- e Distância entre a carga e o adesivo, em mm;
- l_b Comprimento de fixação, em mm;
- $M_{y,k}$ Momento de cedência plástica, em Nmm (ver tabela 7).

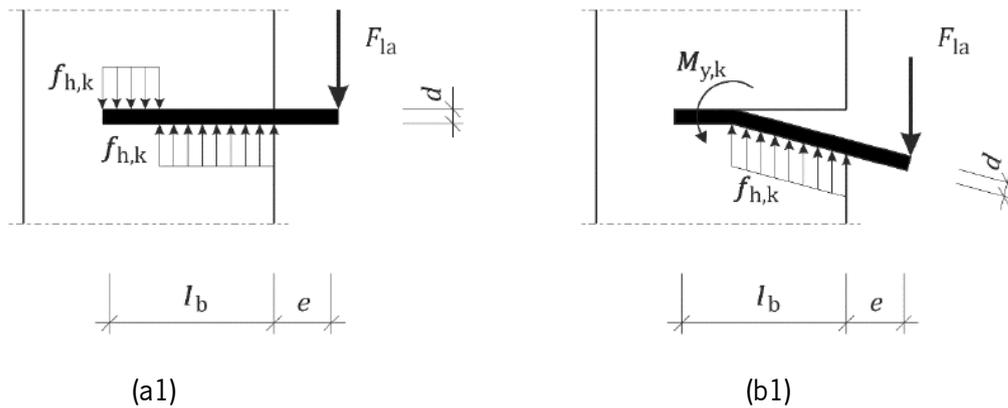


Figura 36 - Modos de rotura para a resistência lateral das cavilhas coladas (prEN 1995-1-1, 2020).

4.6.5 Dimensionamento da ligação

Estes valores resultam de várias pesquisas e testes, onde se concluiu que, para distâncias à volta de $1,5d$, a rotura por tensão da madeira ocorria com frequência, o que não ocorria quando se utilizava os valores das distâncias superiores a $2,0d$. Também se deduziu que, os modos de rotura apresentados dependem do comprimento de fixação.

Em suma, obtiveram-se aos valores apresentados na tabela 26, sendo que, para os varões perpendiculares ao fio de madeira utilizam-se os mesmos valores dos espaçamentos e distâncias mínimas dos ligadores do tipo cavilha, mais precisamente dos parafusos de porca e cavilhas. As figuras 37 e 38 ilustram a posição dos vários valores.

Tabela 26 - Espaçamentos e distâncias mínimas para cavilhas coladas (prEN 1995-1-1, 2020).

Cavilhas coladas	Esforços axiais	Esforços laterais
Paralelamente ao fio	$a_2 = 5d$ $a_{4,c} = 2,5d$	$a_2 = 5d$ $a_{4,c} = 2,5d$ $a_{4,t} = 4d$
Perpendiculares ao fio	$a_1 = 4d$ $a_2 = 4d$ $a_{3,c} = 2,5d$ $a_{4,c} = 2,5d$	Igual aos espaçamentos e distâncias mínimas dos parafusos de porca e cavilhas

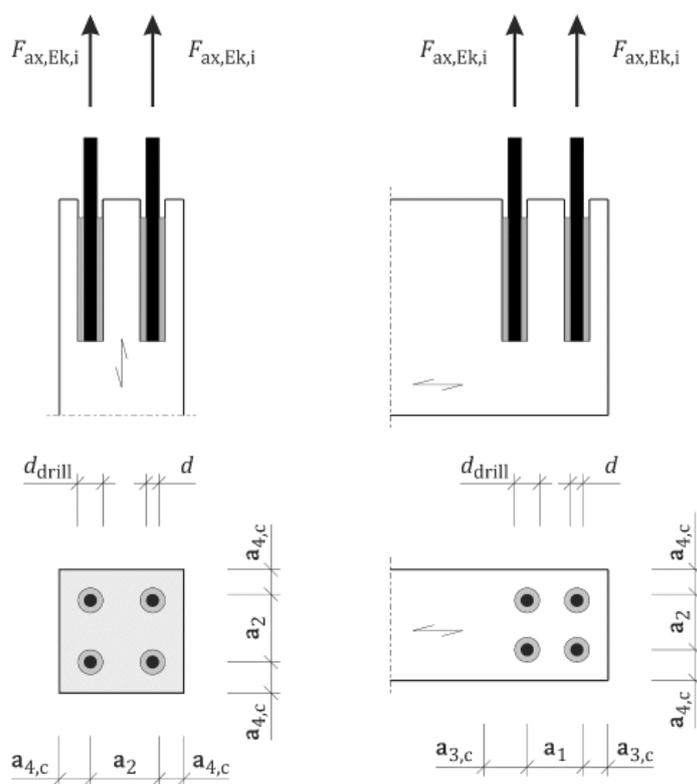


Figura 37 - Especificação dos espaçamentos e distâncias mínimas para forças paralelas ao fio (prEN 1995-1-1, 2020).

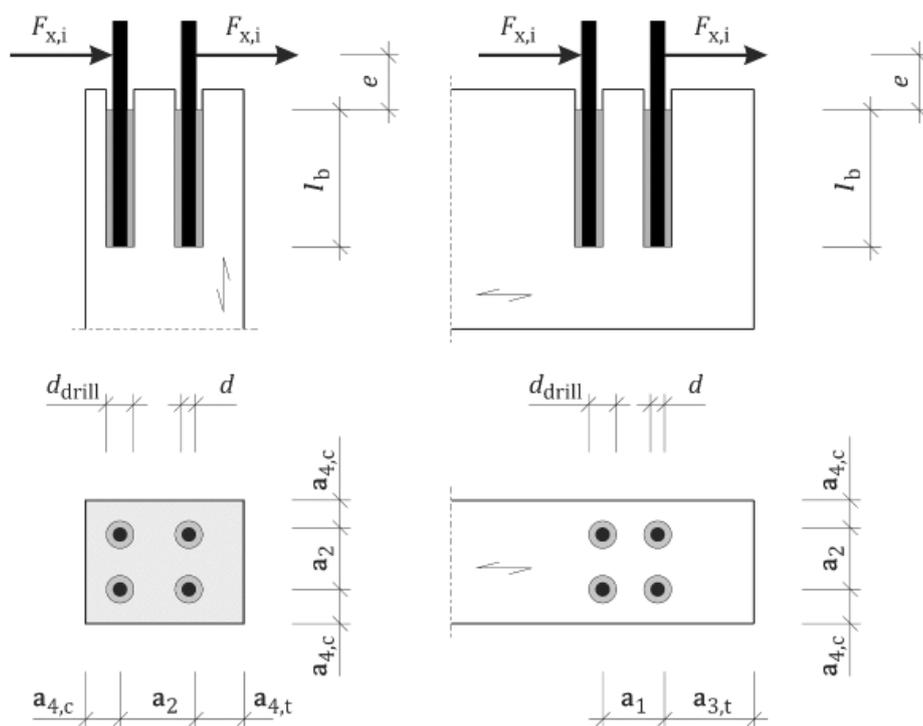


Figura 38 - Especificação dos espaçamentos e distâncias mínimas para forças perpendiculares ao fio (prEN 1995-1-1, 2020).

4.7 Ligações tradicionais

As ligações tradicionais são dimensionadas tendo em conta que transmitem esforços de compressão e de corte nas superfícies de contacto da ligação. O EC5 não abordava nenhuma condição para a sua verificação de segurança, o que originou uma grande dificuldade na sua utilização. A nova versão do EC5 já contempla este tipo de ligações, uma vez que, a evolução tecnológica permitiu uma maior precisão dos seus cortes, reduzindo o tempo de construção e aplicação, levando a melhores resultados das ligações tradicionais.

É importante referir que nas ligações tradicionais, entre a face superior da linha e a perna deve existir uma folga de 1 a 2 mm para evitar a fissuração resultante da excentricidade entre a força e a superfície de contacto, a qual gera tensões na perna perpendiculares às fibras (Barbosa, 2015).

4.7.1 Entalhes

4.7.1.1 Especificações técnicas

Os entalhes associam-se à formação de dente nas superfícies dos elementos a ligar. No caso em que apresentem um dente, estas denominam-se por entalhe simples (figura 39a), porém se exibirem dois dentes, designam-se por entalhe duplo (ver figura 39b).

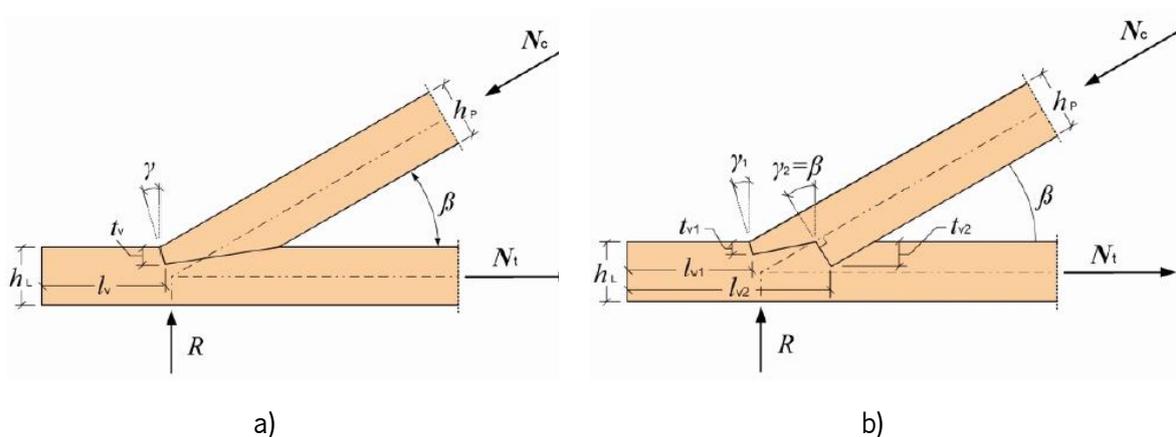


Figura 39 – Ligação tradicional: a) Entalhe Simples; b) Entalhe duplo (Palma, 2009)

A inclinação do entalhe deve minimizar o ângulo entre as tensões de compressão transmitidas no entalhe e a direção das fibras da madeira, em ambos os elementos que concebem a ligação, de forma a aumentar a resistência ao esmagamento da ligação (Branco & Descamps, 2015).

$$\frac{\beta}{2} \leq \gamma \leq \beta \quad (4.118)$$

Em que:

$\gamma = \frac{\beta}{2}$, são os valores recomendados.

Com:

β Ângulo entre a perna e a viga, em graus;

γ Ângulo da zona de contacto, em graus.

No que diz respeito ao comprimento do talão (l_v) e da profundidade do dente (t_v), as seguintes restrições devem ser verificadas. Estes limites impedem que ocorra o enfraquecimento da capacidade resistente do elemento, seja para o entalhe simples ou duplo, as suas profundidades dependem do ângulo formado pelos dois elementos.

$$l_v \geq 150 \text{ mm e } l_{v1} \geq 150 \text{ mm} \quad (4.119)$$

$$t_v \leq \frac{h_l}{6} \quad (4.120)$$

$$t_{v1}, t_{v2} \leq \begin{cases} \frac{h_l}{4} & \beta < 50^\circ \\ \frac{h_l}{6} & \beta > 60^\circ \end{cases} \quad (4.121)$$

Com:

$l_v; l_{v1}$ Comprimento do talão, em mm;

t_v Profundidade do dente simples, em mm;

$t_{v1}; t_{v2}$ Profundidades dos dentes no entalhe duplo, em mm;

h_l Altura da viga, em mm;

β Ângulo entre a perna e a viga, em graus.

No caso em que ocorram valores intermédios para os ângulos, recorre-se à interpolação linear para se determinar os seus devidos valores.

Para o entalhe duplo, a diferença entre os dois dentes deve ser superior a 10 mm, respeitando a seguinte expressão.

$$t_{v2} - t_{v1} \geq 10 \text{ mm} \quad (4.122)$$

Com:

$t_{v1}; t_{v2}$ Profundidades dos dentes no entalhe duplo, em mm;

4.7.1.2 Dimensionamento da força axial

$$F_{car,Ed} \leq \begin{cases} F_{car,Rd} & \text{para o entalhe simples} \\ F_{car1,Rd} + F_{car2,Rd} & \text{para o entalhe duplo} \end{cases} \quad (4.123)$$

$$F_{car,Rd} = \frac{bt_v f_{c,\alpha,d}}{\cos \gamma \cos(\beta - \gamma)} \quad \text{para o dente do entalhe simples} \quad (4.124)$$

$$F_{car1,Rd} = \frac{bt_{v1} f_{c,\alpha,d}}{\cos \gamma \cos(\beta - \gamma)} \quad \text{para o dente frontal do entalhe duplo} \quad (4.125)$$

$$F_{car2,Rd} = \frac{bt_{v2} f_{c,\alpha,d}}{\cos \beta} \quad \text{para o dente interior do entalhe duplo} \quad (4.126)$$

Com:

- $F_{car,Ed}$ Força de compressão da perna, em N;
 $F_{car,Rd}$ Valor de cálculo da força resistente do dente, para o entalhe simples, em N;
 $F_{car1,Rd}$ Valor de cálculo da força resistente do dente frontal, para o entalhe duplo, em N;
 $F_{car2,Rd}$ Valor de cálculo da força resistente do dente interior, para o entalhe duplo, em N;
 b Comprimento do dente, em mm;
 t_v Profundidade do dente do entalhe simples, em mm;
 $t_{v1}; t_{v2}$ Profundidades dos dentes do entalhe duplo, em mm;
 $f_{c,\alpha,d}$ Força de compressão para um determinado ângulo com o fio, em N/mm²;
 β Ângulo entre a perna e a viga, em graus;
 γ Ângulo da zona de contacto, em graus.

Na superfície da viga, na zona de ligação do entalhe simples ou duplo, ocorrem tensões de compressão devido ao contacto da perna com a viga. Quando o ângulo entre o eixo da viga e a zona de contacto dos dois elementos for superior a 50° deve-se considerar a tensão de compressão ($\sigma_{c,90,d}$) nesta zona através da expressão (4.127). Na situação em que o ângulo é inferior ou igual a 50° não se considera a tensão de compressão na capacidade resistente da ligação.

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (4.127)$$

Em que:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{car,Ed} \sin \beta}{b \left(\frac{h_p}{\sin \beta} - t_v \tan \gamma \right)} \quad (4.128)$$

Com:

- $F_{car,Ed}$ Força de compressão da perna, em N;
 $\sigma_{c,90,d}$ Valor de cálculo da tensão perpendicular ao fio, em N/mm²;
 h_p Altura da perna, em mm;
 $k_{c,90}$ Fator de redução;
 b Comprimento do dente, em mm;
 t_v Profundidade do dente, em mm;
 $f_{c,90,d}$ Força de compressão para um ângulo perpendicular ao fio, em N/mm²;
 β Ângulo entre a perna e a viga, em graus;

γ Ângulo da zona de contacto, em graus.

4.7.1.3 Dimensionamento da força de corte

As forças de corte, paralelas às fibras, desenvolvem-se ao longo do talão, sendo que este se deve prolongar com um determinado comprimento de forma a resistir às forças de corte. Como a sua distribuição não é linear, e para se dimensionar considerando uma distribuição uniforme das forças de corte, responsáveis pela rotura frágil da madeira, utiliza-se um fator de redução presente na expressão (4.132). Os limites impostos pela expressão (4.133) correspondem ao comprimento onde as forças de corte apresentam maior impacto no dimensionamento da ligação. Assim, através da expressão (4.129) determina-se o valor da tensão de corte ($\tau_{v,d}$) para as ligações com entalhe simples ou duplo.

$$\tau_{v,d} \leq k_{red} f_{v,d} \quad (4.129)$$

Em que:

$$\tau_{v,d} = \frac{F_{Ed} \cos \beta}{b l_{v,ef}} \quad (4.130)$$

$$F_{Ed} = \begin{cases} F_{car,Ed} & \text{para a superfície de corte inferior de um entalhe duplo} \\ \frac{F_{car1,Rd}}{F_{car1,Rd} + F_{car2,Rd}} & \text{para a superfície de corte superior de um entalhe duplo} \end{cases} \quad (4.131)$$

$$k_{red} = \begin{cases} 0,6 & \text{para madeira maciça} \\ 0,8 & \text{para MLC} \end{cases} \quad (4.132)$$

$$l_{v,ef} = \begin{cases} l_v \leq 8t_v & \text{para uma ligação de entalhe simples} \\ l_{v1} \leq 8t_{v1} & \text{para o dente frontal de um entalhe duplo} \\ 0,7l_{v2} & \text{para o dente interior de um entalhe duplo} \end{cases} \quad (4.133)$$

Com:

$\tau_{v,d}$ Valor de cálculo da tensão de corte, em N/mm²;

$F_{car,Ed}$ Força de compressão da perna, em N;

$F_{car1,Rd}$ Valor de cálculo da força resistente do dente frontal, para o entalhe duplo, em N;

$F_{car2,Rd}$ Valor de cálculo da força resistente do dente interior, para o entalhe duplo, em N;

k_{red} Fator de redução;

$l_{v,ef}$ Comprimento efetivo do talão, em mm;

l_{v2} Comprimento do talão numa ligação de entalhe duplo, em mm;

- $f_{v,d}$ Valor de cálculo da força de corte na viga, em N/mm²;
- t_v ; t_{v1} Profundidade dos dentes de um entalhe simples e duplo, respetivamente, em mm.

CAPÍTULO 5

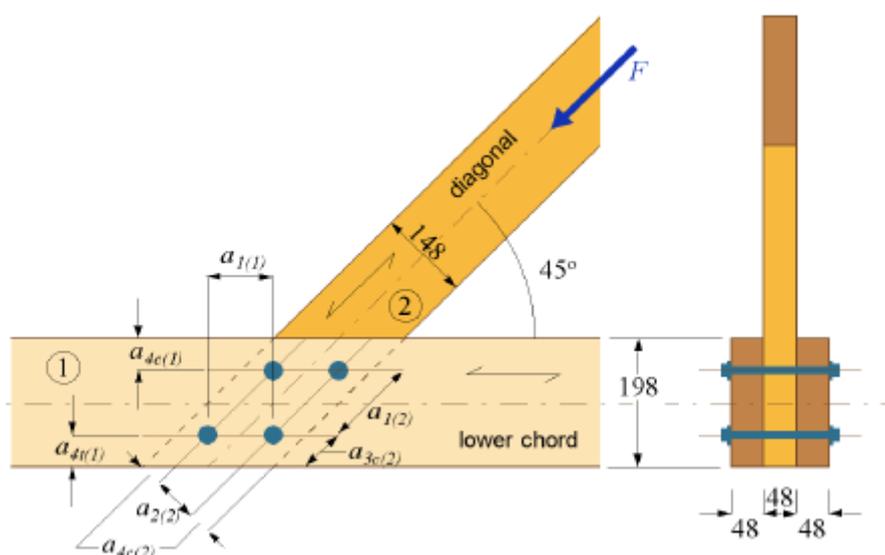
5. Dimensionamento de uma ligação do tipo cavilha

Depois de no *Capítulo 4* se ter analisado as várias modificações propostas pela segunda geração do Eurocódigo 5, aqui apresenta-se um exemplo prático com o objetivo de aplicar o “novo” EC5. Selecionou-se uma ligação comum, representativa das ligações estruturais de madeira do tipo cavilha, e aplicou-se a nova proposta para o EC5, comparando com a versão atual, para assim ser mais fácil evidenciar as alterações que esta segunda geração do EC5 proporciona.

5.1 Dimensionamento de uma ligação de acordo com o Eurocódigo 5

Na Figura 40 encontra-se uma ligação entre dois elementos de madeira através de quatro ligadores. A ligação realizou-se com 4 parafusos de porca, respeitando os espaçamentos e distâncias mínimas, sendo que se escolheu um diâmetro 14 mm. Este valor obteve-se através da igualdade $3d+4d+3d=10d$.

Pretende-se determinar o valor de cálculo máximo da força F , aplicada na direção das fibras da diagonal, sem que ocorra a rotura da ligação.



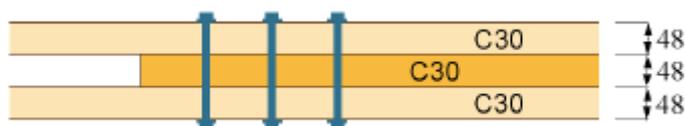


Figura 40 - Esquema da ligação proposta (Bell, 2008)

Tabela 27 - Valores para os materiais da ligação

Classe de Resistência da Madeira C30 → $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$;
Valor característico da tensão última do aço, $f_{u,k} = 800 \text{ N/mm}^2$;
$\gamma_M = 1,3$; $\gamma_{M,0} = 1,1$ e $k_{mod} = 0,9$

Tabela 28 - Espaçamentos e distâncias mínimas da ligação

$a_{4t(1)} = 55 \text{ mm}$	$a_{3c(2)} = 78 \text{ mm}$
$a_{4c(1)} = 50 \text{ mm}$	$a_{1(2)} = 131 \text{ mm}$
$a_{2(2)} = 60 \text{ mm}$	$a_{4c(2)} = 44 \text{ mm}$

Através dos valores do enunciado, calcula-se o valor característico do momento de cedência plástica de acordo com a equação (5.1).

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6} \quad (5.1)$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6} \leftrightarrow M_{y,Rk} = 0,3 \times 800 \times 14^{2,6} \leftrightarrow M_{y,Rk} = 229\,162 \text{ Nmm}$$

No primeiro cálculo considerou-se a força F paralela as fibras da diagonal da ligação ($f_{h,2,k}$), que forma um ângulo de 45° com as fibras da viga ($f_{h,1,k}$). Através destas definições, determinam-se os valores característicos da resistência ao esmagamento localizado para os dois elementos de madeira, de acordo das equações (5.2) e (5.3).

$$f_{h,2,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k \quad (5.2)$$

$$f_{h,2,k} = 0,082(1 - 0,01 \times 14) \times 380 \leftrightarrow f_{h,2,k} = 26,80 \text{ MPa}$$

$$f_{h,1,k} = \frac{f_{h,2,k}}{k_{90}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2} \quad (5.3)$$

$$f_{h,1,k} = \frac{26,80}{1,56 \times (\sin 45)^2 + (\cos 45)^2} \leftrightarrow f_{h,1,k} = 20,90 \text{ MPa}$$

Cálculo auxiliar:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad (5.4)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \leftrightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 14 \leftrightarrow k_{90} = 1,56$$

Com os valores característicos da resistência ao esmagamento localizado conhecidos, calcula-se o valor de β .

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5.5)$$

$$\beta = \frac{26,80}{20,90} \leftrightarrow \beta = 1,28$$

De acordo com o EC5, despreza-se o efeito de corda, a fim de se garantir um dimensionamento do lado da segurança. Assim, como se trata de uma ligação madeira-madeira em corte duplo, deve-se verificar os modos de rotura (g), (h), (j) e (k) (equação (8.7) do EC5).

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} & \text{(k)} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 20,90 \times 48 \times 14 \\ 0,5 \times 26,80 \times 48 \times 14 \\ 4496,05 \times \left[\sqrt{5,84 + 5,71} - 1,28 \right] \\ 1,15 \sqrt{\frac{2 \times 1,28}{1 + 1,28}} \times 1149,6,98 \end{cases} \leftrightarrow F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 14044,80 \text{ N} \\ 9004,80 \text{ N} \\ 9525,01 \text{ N} \\ 14009,88 \text{ N} \end{cases}$$

Como o valor mínimo obtido na expressão (5.6) apresenta-se no modo de rotura (h), conclui-se que, este modo de rotura prevalece na ligação.

De seguida, deve-se verificar o número efetivo de ligadores, para tal, averigua-se os espaçamentos e distâncias mínimas da tabela 28 para o diâmetro escolhido dos parafusos de porca e, através da expressão (5.7), calcula-se o número efetivo de ligadores paralelos ao fio da diagonal.

De acordo com a tabela 29 verifica-se que os valores dos espaçamentos e distâncias mínimas se encontram em conformidade com o diâmetro escolhido.

Tabela 29 - Confirmação dos valores dos espaçamentos e distâncias mínimas da ligação

$a_{4t(1)} = 55 \text{ mm} > (2+2 \sin 45)d = 48 \text{ mm}$	$a_{3c(2)} = 78 \text{ mm} > 4d = 56 \text{ mm}$
$a_{4c(1)} = 50 \text{ mm} > 3d = 42 \text{ mm}$	$a_{1(2)} = 131 \text{ mm} > 5d = 70 \text{ mm}$
$a_{2(2)} = 60 \text{ mm} > 4d = 56 \text{ mm}$	$a_{4c(2)} = 44 \text{ mm} > 3d = 42 \text{ mm}$

$$n_{ef} = \min \left[n^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_{1(2)}}{13d}}; n \right] \quad (5.7)$$

$$n_{ef} = \min \left[2^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{131}{13 \times 14}}; 2 \right] \leftrightarrow n_{ef} = \min[1,72; 2] \leftrightarrow n_{ef} = 1,72$$

Depois de se obter o número efetivo de ligadores, o valor característico da ligação, para dois ligadores paralelos ao fio da diagonal, determina-se através da expressão (5.8).

$$F_{k(2)} = (n_{ef} \times 2) \times (F_{v,Rk} \times 2) \quad (5.8)$$

$$F_{k(2)} = (1,72 \times 2) \times (9004,80 \times 2) \leftrightarrow F_{k(2)} = 61953,02 \text{ N} \leftrightarrow F_{k(2)} = 62,0 \text{ kN}$$

De acordo com o ponto 8.1.2 (5) do Eurocódigo 5, para uma força que atua com um determinado ângulo em relação à direção da fiada, deve-se verificar se a componente da força paralela à fiada é menor ou igual à capacidade resistente calculada com a expressão (5.8). Nesta situação, a força, que se pretende determinar, encontra-se definida por $0,71F$, uma vez que, se considera paralela às fibras da viga.

Assim, deve-se determinar o espaçamento mínimo entre os ligadores paralelos às fibras da viga. Na figura 40 encontra-se representada pela distância $a_{1(1)}$, cujo seu valor se encontra por definir, porém, como a diagonal se encontra a 45° da viga, facilmente, se determina através do Teorema de Pitágoras.

$$a_{1(1)} = \sqrt{2a_{2(2)}^2} \quad (5.9)$$

$$a_{1(1)} = \sqrt{2 \times 60^2} \leftrightarrow a_{1(1)} = 85 \text{ mm}$$

Com a distância $a_{1(1)}$ conhecida, pode-se determinar o número efetivo de ligadores para a situação apresentada.

$$n_{ef} = \min \left[n^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_{1(1)}}{13d}}; n \right] \quad (5.10)$$

$$n_{ef} = \min \left[2^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{85}{13 \times 14}}; 2 \right] \leftrightarrow n_{ef} = \min[1,54; 2] \leftrightarrow n_{ef} = 1,54$$

Além disso, deve-se determinar os novos valores característicos da resistência ao esmagamento localizado. Quando a força $0,71F$ se encontra paralela as fibras da viga ($f_{h,1,k}$), formando um ângulo de 45° com as fibras da diagonal ($f_{h,2,k}$).

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k \quad (5.11)$$

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01 \times 14) \times 380 \leftrightarrow f_{h,1,k} = 26,80 \text{ MPa}$$

$$f_{h,2,k} = \frac{f_{h,1,k}}{k_{90}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2} \quad (5.12)$$

$$f_{h,2,k} = \frac{26,8}{1,56 \times (\sin 45)^2 + (\cos 45)^2} \leftrightarrow f_{h,2,k} = 20,90 \text{ MPa}$$

Cálculo auxiliar:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad (5.13)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \leftrightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 14 \leftrightarrow k_{90} = 1,56$$

Com os valores característicos da resistência ao esmagamento localizado calculados, determina-se o novo valor de β .

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5.14)$$

$$\beta = \frac{20,90}{26,80} \leftrightarrow \beta = 0,78$$

Por fim, determina-se o modo de rotura predominante da ligação através da expressão (5.15).

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] & \text{(i)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} & \text{(k)} \end{cases} \quad (5.15)$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 26,80 \times 48 \times 14 \\ 0,5 \times 20,90 \times 48 \times 14 \\ 6802,19 \times [\sqrt{2,78 + 2,30} - 0,78] \\ 1,15 \sqrt{\frac{2 \times 0,78}{1 + 0,78}} \times 13113,47 \end{cases} \leftrightarrow F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 18009,60 \text{ N} \\ 7022,40 \text{ N} \\ 10025,65 \text{ N} \\ 14117,83 \text{ N} \end{cases}$$

Como o modo de rotura predominante da ligação encontra-se, novamente, no modo de rotura (h) e o número efetivo de ligadores já se determinou para esta situação, pode-se calcular a força $0,71F$, que atua na direção paralela às fibras da viga.

$$0,71F_{k(1)} = (n_{ef} \times 2) \times (F_{v,Rk} \times 2) \quad (5.16)$$

$$F_{k(1)} = \frac{(1,72 \times 2) \times (7022,40 \times 2)}{0,71} \leftrightarrow F_{k(1)} = 60926,74 \text{ N} \leftrightarrow F_{k(1)} = 60,93 \text{ kN}$$

Em suma, como a força paralela às fibras da viga apresenta menor valor, destaca-se, assim, por ser a força que governa a ligação. Por fim, determina-se o valor de cálculo da força F , que atua na ligação, de acordo com a expressão (5.17).

$$F_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \times F_{k(1)} \quad (5.17)$$

$$F_d = \frac{0,9}{1,3} \times 60926,74 \leftrightarrow F_d = 42180,05 \text{ N} \leftrightarrow F_d = 42,18 \text{ kN}$$

Contudo, deve-se verificar o modo de rotura frágil da ligação a partir do ponto 8.1.4 do Eurocódigo 5. As duas componentes da força F , já se encontram conhecidas, logo precisa-se de se conhecer o valor característico da capacidade resistente de fendimento, a partir da expressão (5.18).

$$F_{90,Rk} = 14bw \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad (5.18)$$

$$F_{90,Rk} = 14 \times 96 \times 1 \sqrt{\frac{143}{\left(1 - \frac{143}{198}\right)}} \leftrightarrow F_{90,Rk} = 30494,29 \text{ N} \leftrightarrow F_{90,Rk} = 30,49 \text{ kN}$$

Cálculo auxiliar:

$$w = 1 \quad (5.19)$$

$$b = 2 \times 48 = 96 \text{ mm} \quad (5.20)$$

$$h = 198 \text{ mm} \quad (5.21)$$

$$h_e = h - a_{4t(1)} \leftrightarrow h_e = 198 - 55 = 143 \text{ mm} \quad (5.22)$$

Assumindo que a componente vertical da força F é de $0,71F$, obtendo um valor de 43,24 kN, que se divide em duas forças iguais, e como o valor é superior ao obtido na expressão (5.18), pode-se concluir que o modo de rotura frágil perpendicular às fibras não é problema para a ligação em estudo.

5.2 Dimensionamento de uma ligação de acordo com o novo Eurocódigo 5

Para a demonstração das novas fórmulas propostas pela revisão do Eurocódigo 5, recorreu-se novamente à ligação da figura 40 (página 115), utilizando os mesmos valores apresentados na tabela 27 e 28. O objetivo principal do problema passa pela determinação do valor de cálculo da força F aplicada na diagonal da ligação.

Em primeiro lugar, determina-se o valor característico do momento de cedência plástica, para os parafusos de porca utilizados na ligação.

$$M_{y,Rk} = \frac{1}{6} \times f_{y,ef} d^3 \quad (5.23)$$

$$M_{y,Rk} = \frac{1}{6} \times 720 \times 14^3 \leftrightarrow M_{y,Rk} = 329280 \text{ Nmm}$$

Cálculo auxiliar:

$$f_{y,ef} = \begin{cases} 0,45(f_{y,k} + f_{u,k}) & \text{se } f_{u,k} < 450 \text{ N/mm}^2 \\ 0,9f_{u,k} & \text{se } f_{u,k} \geq 450 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (5.24)$$

$$f_{y,ef} = 0,9 \times 800 \leftrightarrow f_{y,ef} = 720 \text{ MPa}$$

Para o cálculo do valor característico da resistência ao esmagamento localizado da madeira considera-se a força F paralela as fibras da diagonal da ligação ($\alpha=0^\circ$), que forma um ângulo de 45° com as fibras da viga ($\alpha=45^\circ$).

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,082(1 - 0,01d) \rho_k}{k_{ma}} \quad (5.25)$$

$$f_{h,45,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 \times 14) \times 380}{1,28} \leftrightarrow f_{h,45,k} = 20,90 \text{ MPa} = f_{h,1,k}$$

$$f_{h,0,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 \times 14) \times 380}{1,0} \leftrightarrow f_{h,0,k} = 26,80 \text{ MPa} = f_{h,2,k}$$

Cálculo auxiliar:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad (5.26)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \leftrightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 14 \leftrightarrow k_{90} = 1,56$$

$$k_{ma} = k_{90}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2 \quad (5.27)$$

$$k_{ma} = k_{90}(\sin 0^\circ)^2 + (\cos 0^\circ)^2 \leftrightarrow k_{ma} = 1,00$$

$$k_{ma} = k_{90}(\sin 45^\circ)^2 + (\cos 45^\circ)^2 \leftrightarrow k_{ma} = 1,28$$

Depois de se conhecer os valores característicos da resistência ao esmagamento localizado, calcula-se o valor de β .

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5.28)$$

$$\beta = \frac{26,8}{20,9} \leftrightarrow \beta = 1,28$$

Como se trata de uma ligação madeira-madeira em corte duplo, deve-se determinar o comprimento de incorporação para o modo de rotura (d) de acordo com a expressão (5.29).

$$t_{h1} = 1.05\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k}d}} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta}} \right) \quad (5.29)$$

$$t_{h1} = 1.05 \times \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{329280}{26,8 \times 14}} \times \left(\frac{1,28}{\sqrt{1 + 1,28}} \right) \leftrightarrow t_{h1} = 24,70 \text{ mm}$$

Para a determinação do valor de cálculo da resistência lateral por plano de corte e por ligador, primeiramente, calcula-se o efeito de cavilha do ligador ($F_{D,k}$) e, de seguida, o respetivo valor do efeito de corda ($F_{T,d}$).

$$F_{D,k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_{h1} d & \text{(a)} \\ f_{h,2,k} t_{h2} d & \text{(b)} \\ 1,05 \frac{f_{h,2,k} t_{h1} d}{2 + \beta} \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{4(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,2,k} d t_{h1}^2}} - 1 \right] & \text{(d)} \\ 1,15 \times 2 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} & \text{(e)} \end{cases} \quad (5.30)$$

$$F_{D,k} = \min \begin{cases} 20,9 \times 48 \times 14 \\ 26,8 \times 48 \times 14 \\ 6802,19 \times [\sqrt{22,45} - 1] \\ 2,3 \times \sqrt{0,44} \times \sqrt{329280 \times 26,80 \times 14} \end{cases} \Leftrightarrow F_{D,k} = \min \begin{cases} 14044,80 \text{ N} \\ 18009,60 \text{ N} \\ 11095,50 \text{ N} \\ 16930,68 \text{ N} \end{cases}$$

O efeito de corda deve ser adicionado aos modos de rotura (d) e (e) e o seu cálculo ocorre de acordo com as próximas expressões.

Para o cálculo deste efeito deve-se, em primeiro lugar, determinar o valor de cálculo da resistência axial do ligador através da expressão (5.31).

$$F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \max \left\{ \begin{array}{l} F_{p,k} \\ F_{w,k} \end{array} \right. \\ \frac{F_{t,k}}{\gamma_{M,0}} \end{cases} \quad (5.31)$$

$$F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} \frac{0,9}{1,3} \times 7912,80 \\ \frac{110779,20}{1,1} \end{cases} \Leftrightarrow F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} 5478,09 \\ 100708,36 \end{cases} \Leftrightarrow F_{ax,Rd} = 5478,09 \text{ N}$$

Cálculo auxiliar:

1) Cálculo do valor característico da capacidade resistente ao arranque da cabeça do ligador

$$F_{p,k} = \begin{cases} A_{head} f_{head} & \text{se } A_{head} \leq 4072 \text{ mm}^2 \\ 3f_{c,90,k} A_{head} & \text{se } A_{head} > 4072 \text{ mm}^2 \end{cases} \quad (5.32)$$

$$F_{p,k} = 4072 \times 0,44 \leftrightarrow F_{p,k} = 1791,68 \text{ N}$$

Cálculo auxiliar:

$$f_{head} = 17 - 0,23d_{head} \quad (5.33)$$

$$f_{head} = 17 - 0,23 \times 72 \leftrightarrow f_{head} = 0,44 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{head} = 4072 \text{ mm}^2 \text{ para } d_{head} = 72 \text{ mm}$$

2) Cálculo do valor característico da capacidade resistente ao arranque do ligador

$$F_{w,k} = \pi d t_w f_{w,k} \quad (5.34)$$

$$F_{w,k} = 3,14 \times 14 \times 48 \times 3,75 \leftrightarrow F_{w,k} = 7912,80 \text{ N}$$

Cálculo auxiliar:

$$f_{w,k} = f_{w,ref} k_w k_{mat} \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{k_p} \quad (5.35)$$

$$f_{w,k} = 3,43 \times 1,0 \times 1,0 \times \left(\frac{380}{350} \right)^{1,10} \leftrightarrow f_{w,k} = 3,75 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{w,ref} = 8,2d^{-0,33} \leftrightarrow f_{w,ref} = 8,2 \times 14^{-0,33} \leftrightarrow f_{w,ref} = 3,43 \text{ N}$$

$$k_w = 1,00$$

$$k_{mat} = 1,00$$

$$k_p = 1,10$$

3) Cálculo do valor característico da capacidade resistente à tração do ligador

$$F_{t,k} = 0,9 \frac{\pi d^2}{4} f_{u,k} \quad (5.36)$$

$$F_{t,k} = 0,9 \times \frac{3,14 \times 14^2}{4} \times 800 \leftrightarrow F_{t,k} = 110779,20 \text{ N}$$

Por último, o respetivo valor do efeito de corda determina-se através da expressão (5.37).

$$F_{T,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{T,1} F_{ax,d} \\ k_{T,2} F_{D,d} \end{array} \right. \quad (5.37)$$

$$F_{T,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \times 5478,09 \\ 0,25 \times \left(\frac{0,9}{1,3} \times 11095,50 \right) \end{array} \right. \leftrightarrow F_{T,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1369,52 \\ 1920,38 \end{array} \right. \leftrightarrow F_{T,d} = 1369,52 \text{ N}$$

Com todos os cálculos efetuados, o valor de cálculo da resistência lateral por ligador e por plano de corte da ligação determina-se através da expressão (5.38), considerando o efeito de cavilha e o efeito de corda

do ligador. Por outro lado, como se pretende determinar o valor mínimo, pelo facto de ser o primeiro modo de rotura a manifestar-se na ligação, facilmente, se percebe que o modo de rotura (d) apresenta o menor valor e que se trata do modo de rotura predominante, deste modo, apenas se apresenta o cálculo para este modo de rotura.

$$F_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} F_{D,k} + F_{T,d} \quad (5.38)$$

$$F_{v,d} = \frac{0,9}{1,3} \times 11095,50 + 1369,52 \leftrightarrow F_{v,d} = 12465,02 \text{ N}$$

De seguida, deve-se conhecer o número efetivo de ligadores, mais precisamente a distância $a_{1(2)}$, uma vez que, se trata da distância entre os ligadores no sentido paralelo das fibras da diagonal da ligação.

$$n_{ef} = \min \left[n^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_{1(2)}}{13d}}; n \right] \quad (5.39)$$

$$n_{ef} = \min \left[2^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{131}{13 \times 14}}; 2 \right] \leftrightarrow n_{ef} = \min[1,72; 2] \leftrightarrow n_{ef} = 1,72$$

Cálculo auxiliar:

$$a_{1(2)} = 131 \text{ mm} > 5d \quad (5.40)$$

$$a_{1(2)} = 131 \text{ mm} > 5 \times 14 \leftrightarrow a_{1(2)} = 131 \text{ mm} > 70 \text{ mm}$$

Depois de se obter o número efetivo de ligadores, o valor de cálculo da ligação, para dois ligadores paralelos ao fio da diagonal, determina-se através da expressão (5.41).

$$F_{d(2)} = (n_{ef} \times 2) \times (F_{v,d} \times 2) \quad (5.41)$$

$$F_{d(2)} = (1,72 \times 2) \times (12465,20 \times 2) \leftrightarrow F_{d(2)} = 85760,58 \text{ N} \leftrightarrow F_{d(2)} = 85,76 \text{ kN}$$

Porém, quando uma força atua com um determinado ângulo em relação à direção da fiada, deve-se verificar se a componente da força paralela à fiada é menor ou igual à capacidade resistente calculada de acordo com a expressão (5.41). Este problema encontra-se definido por uma força de $0,71F$, uma vez que, se considera a força paralela as fibras da viga.

Com isto, deve-se determinar o espaçamento mínimo entre os ligadores paralelos às fibras da viga. Para este cálculo realiza-se o mesmo procedimento, adotado no *Dimensionamento 1*, alcançando um valor do número efetivo de ligadores de 1,54.

Contudo, para o cálculo do valor característico da resistência ao esmagamento localizado para a força $0,71F$ determina-se de acordo com a seguinte expressão. Nesta situação considera-se a força paralela às fibras da viga ($\alpha=0^\circ$), apresentando uma diferença de 45° em relação às fibras da diagonal ($\alpha=45^\circ$).

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,082(1 - 0,01d) \rho_k}{k_{ma}} \quad (5.42)$$

$$f_{h,45,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 \times 14) \times 380}{1,28} \leftrightarrow f_{h,45,k} = 20,90 \text{ MPa} = f_{h,2,k}$$

$$f_{h,0,k} = \frac{0,082(1 - 0,01 \times 14) \times 380}{1,0} \leftrightarrow f_{h,0,k} = 26,80 \text{ MPa} = f_{h,1,k}$$

Cálculo auxiliar:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad (5.43)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \leftrightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 14 \leftrightarrow k_{90} = 1,56$$

$$k_{ma} = k_{90}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2 \quad (5.44)$$

$$k_{ma} = k_{90}(\sin 0^\circ)^2 + (\cos 0^\circ)^2 \leftrightarrow k_{ma} = 1,00$$

$$k_{ma} = k_{90}(\sin 45^\circ)^2 + (\cos 45^\circ)^2 \leftrightarrow k_{ma} = 1,28$$

Com os valores característicos da resistência ao esmagamento localizado conhecidos, determina-se o valor de β .

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5.45)$$

$$\beta = \frac{20,90}{26,80} \leftrightarrow \beta = 0,78$$

Com a alteração dos valores, deve-se determinar o novo comprimento de incorporação para o cálculo do modo de rotura (d) de acordo com a expressão (5.46).

$$t_{h1} = 1.05\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k}d}} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta}} \right) \quad (5.46)$$

$$t_{h1} = 1,05 \times \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{329280}{20,90 \times 14}} \times \left(\frac{0,78}{\sqrt{1+0,78}} \right) \leftrightarrow t_{h1} = 29,12 \text{ mm}$$

Para a determinação do o valor de cálculo da resistência lateral por plano de corte e por ligador determina-se o novo efeito de cavilha do ligador ($F_{D,k}$). Porém, o valor do efeito de corda ($F_{T,d}$) encontra-se calculado na expressão (5.37) e, como não apresenta alterações, utiliza-se o mesmo resultado obtido.

$$F_{D,k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_{h1} d & \text{(a)} \\ f_{h,2,k} t_{h2} d & \text{(b)} \\ 1,05 \frac{f_{h,2,k} t_{h1} d}{2 + \beta} \left[\sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{4(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,2,k} d t_{h1}^2}} - 1 \right] & \text{(d)} \\ 1,15 \times 2 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta}} \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} & \text{(e)} \end{cases} \quad (5.47)$$

$$F_{D,k} = \min \begin{cases} 26,8 \times 48 \times 14 \\ 20,9 \times 48 \times 14 \\ 3218,18 \times [\sqrt{19,32} - 1] \\ 2,3 \times \sqrt{0,56} \times \sqrt{329280 \times 20,9 \times 14} \end{cases} \leftrightarrow F_{D,k} = \min \begin{cases} 18009,60 \text{ N} \\ 14044,80 \text{ N} \\ 10927,77 \text{ N} \\ 16921,43 \text{ N} \end{cases}$$

Seguidamente, para se determinar o valor de cálculo da resistência lateral por plano de corte e por ligador recorre-se à expressão (5.48). Também neste caso, o modo de rotura (d) apresenta o menor valor e destaca-se como o modo de rotura predominante, sendo assim, apenas realizado o cálculo para este modo de rotura.

$$F_{v,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} F_{D,k} + F_{T,d} \quad (5.48)$$

$$F_{v,d} = \frac{0,9}{1,3} \times 10927,77 + 1369,52 \leftrightarrow F_{v,d} = 12297,29 \text{ N}$$

Com o número efetivo de ligadores conhecido, calcula-se o valor de cálculo da força $0,71F$, que atua no sentido paralelo às fibras da viga.

$$0,71F_{d(1)} = (n_{ef} \times 2) \times (F_{v,d} \times 2) \quad (5.49)$$

$$F_{d(1)} = \frac{(1,54 \times 2) \times (12297,29 \times 2)}{0,71} \leftrightarrow F_{d(1)} = 106691,98 \text{ N} \leftrightarrow F_{d(1)} = 106,69 \text{ kN}$$

Como a força, que atua no sentido paralelo às fibras da diagonal, apresenta um valor menor, realça-se, assim, como a força que governa a ligação. Contudo, deve-se verificar o modo de rotura frágil para o grupo de ligadores perpendicular às fibras da viga. Uma vez que, já são conhecidas as duas componentes da força, que atua na diagonal, apenas é necessário determinar a capacidade resistente ao fendimento ($F_{sp,Rk}$).

Antes de se iniciar o cálculo da capacidade resistente ao fendimento ($F_{sp,Rk}$), deve-se verificar se a razão entre a distância entre o bordo solicitado até à zona onde toda a força da conexão é transmitida (h_e) e a altura da viga (h) é superior ou igual a 0,7. Deste modo, percebe-se se é necessário efetuar o cálculo da resistência.

$$\frac{h_e}{h} \geq 0,7 \quad (5.50)$$

$$\frac{143}{198} \geq 0,7 \leftrightarrow 0,72 \geq 0,7$$

Cálculo auxiliar:

$$h_e = h - a_{4t(1)} \leftrightarrow h_e = 198 - 55 = 143 \text{ mm} \quad (5.51)$$

Assim sendo, assume-se que a força F se divide em duas forças iguais, devido ao ângulo de 45° formado entre a diagonal e a viga, apresentando um valor de 60,35 kN ($F_v = 0,71 \times 85,76$ kN), e como se pode desprezar o cálculo da capacidade resistente ao fendimento ($F_{sp,Rk}$), pode-se concluir que o modo de rotura frágil perpendicular às fibras não é problema para a ligação em estudo.

5.3 Comparação dos resultados

Ao analisar os valores expostos na tabela 30, percebe-se que as alterações que ocorreram no dimensionamento dos ligadores do tipo cavilha apresentam discordância nos vários valores calculados.

Começando pelo valor característico do momento de cedência plástica ($M_{y,Rk}$), onde se percebe que existe uma diferença de 100 kN. Esta desigualdade deve-se à diferença entre as duas fórmulas, visto que, na fórmula proposta pelo “novo” Eurocódigo, para além da tensão última do aço ($f_{u,k}$) também se considerou a sua tensão de cedência ($f_{y,k}$). Por outro lado, os valores característicos da resistência ao esmagamento localizado ($f_{h,k}$) apresentam um processo de cálculo diferente, porém os resultados obtidos são iguais.

No que diz respeito aos valores de cálculo da força F , quer para a diagonal ($F_{\alpha(2)}$), quer para a viga ($F_{\alpha(1)}$), a diferença entre estas é bastante significativa. Isto deve-se, não só a diferença entre as fórmulas de cálculo, mas também em relação à contribuição do efeito de corda, que é considerado no dimensionamento de acordo com o “novo” Eurocódigo.

Por fim, o valor característico da resistência ao fendimento ($F_{sp,Rk}$) apenas se determinou consoante o Eurocódigo 5, uma vez que, de acordo com o “novo” Eurocódigo, pode-se desprezar o seu cálculo se a razão h_e/h for superior ou igual a 0,7, o que se verificou no dimensionamento realizado.

Tabela 30 – Valores obtidos no dimensionamento da ligação

	Eurocódigo 5	“Novo” Eurocódigo 5
Momento de cedência Plástica ($M_{y,Rk}$) (kN.mm)	229,16	329,28
Resistência ao esmagamento localizado ($f_{h,1,k}$) (MPa)	20,90	20,90
Resistência ao esmagamento localizado ($f_{h,2,k}$) (MPa)	26,80	26,80
Valor de cálculo da Força F ($F_{\alpha(2)}$) (kN)	42,92 ($F_{K(2)} = 62,00$)	85,76
Valor de cálculo da Força F ($F_{\alpha(1)}$) (kN)	42,18 ($F_{K(1)} = 60,93$)	106,69
Resistência ao fendimento ($F_{sp,Rk}$) (kN)	30,49	-

CAPÍTULO 6

6. Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões gerais

No presente trabalho realizou-se uma análise à nova geração do Eurocódigo 5, nomeadamente ao capítulo dedicado às ligações do tipo cavilha para estruturas de madeira. Este trabalho tem como finalidade servir de apoio aos projetistas para a utilização deste novo documento, analisando as alterações introduzidas e comparando com a atual versão.

Antes do foco nas ligações, destacou-se a importância da madeira na construção civil, pelo facto de ser o único material que se pode renovar e reutilizar, permitindo alcançar um dos objetivos cruciais da atualidade, a construção sustentável. Porém, os conhecimentos sobre a madeira, que se destina a empregar numa estrutura, tornam-se cruciais, na medida em que, a sua anisometria, os seus defeitos ou as alterações, que ocorrem na madeira devido às variações da humidade, podem colocar a estrutura em perigo, uma vez que, se estes problemas ocorrerem nas ligações, os pontos de maior fragilidade, podem conduzir ao colapso da mesma, daí que, todos os aspetos técnicos devem ser devidamente analisadas, com o objetivo de assegurar a sua estabilidade e a sua durabilidade.

Os avanços tecnológicos permitiram a introdução de novos materiais, onde se realçam determinadas propriedades, que oferecem à madeira um conjunto de soluções eficientes e amplas para os vários obstáculos da construção civil. No que diz respeito ao Eurocódigo 5, este não acompanhou este desenvolvimento tecnológico ao nível da madeira, surgindo a necessidade de o rever e acrescentar as novas pesquisas levadas a cabo por diferentes autores, a fim de tornar o documento mais amplo para todas as situações de dimensionamento.

O comportamento das estruturas de madeira encontra-se dependente do comportamento das ligações, apresentando-se como o principal foco dos projetistas, daí que, este trabalho salientou-se nos ligadores

do tipo cavilha, visto que, são os ligadores mais utilizados e onde se encontram várias alterações, que tornam o seu dimensionamento mais complexo.

Por outro lado, as alterações que ocorreram no Eurocódigo 5 surgem com o objetivo de ajudar os projetistas no dimensionamento das estruturas de madeira, já que, no EYM apenas se apresenta dez modos de rotura para se determinar o efeito de cavilha do ligador e uma única fórmula para se calcular as várias resistências. Um facto importante neste novo modelo de cálculo encontra-se nas ligações aço-madeira, onde projetistas não necessitam de se preocupar se utilizam uma chapa de aço delgada ou espessa, ou de verificar a resistência da mesma, na medida em que, a fórmula se interpola automaticamente verificando os vários passos referidos.

Com os novos derivados de madeira presentes no novo documento e após vários testes realizados, o cálculo do valor característico da resistência ao esmagamento localizado da madeira e do momento de cedência plástica englobam mais fórmulas para a sua determinação, tendo em consideração o tipo de ligador, o material em que se executa a ligação e, até, a classe de resistência do aço do ligador.

No que diz respeito ao efeito de corda de uma ligação do tipo cavilha, no presente EC5 era determinada de forma empírica através de percentagens ou, em determinadas situações, considerava-se nula, a fim de se obter um dimensionamento do lado da segurança. Com a revisão do documento tornou-se possível determinar de forma mais concreta e perceber o seu contributo no cálculo da resistência lateral por ligador e por plano de corte.

Outra novidade, e já há muito esperada pelos técnicos, passou pela introdução da normalização do dimensionamento das cavilhas de madeira, uma vez que, este tipo de ligação já se encontrava a ser praticada em algumas ligações tradicionais, mas a falta de uma norma de dimensionamento tornava-se uma grande limitação à sua utilização.

O modo de rotura frágil de um grupo de ligadores paralelos ao fio de madeira também se encontra mais pormenorizado, pelo facto de que, no presente EC5 apenas se encontrava a rutura em bloco no Anexo A para as ligações aço-madeira, porém, com a revisão do documento, adicionaram-se outros modos de rotura, dependendo da profundidade de penetração do ligador ou da disposição na mesma. No modo de rotura frágil de um grupo de ligadores perpendiculares ao fio de madeira tornou-se mais específico com a modificação de vários parâmetros no cálculo da resistência ao fendimento. Por outro lado, adicionou-se um requisito novo que, rapidamente, se percebe se o seu cálculo é necessário para o dimensionamento da ligação.

Em segundo lugar, introduziram-se novas ligações, como o caso do tubo de aço com reforço de DVW, os varões colados e as ligações tradicionais. Estas ligações surgem como novas possibilidades para os projetistas aplicarem nas estruturas de madeira, com recurso a uma norma europeia para verificar a sua segurança. Algumas destas ligações já eram empregues através de conhecimentos posteriores ou de alguns requisitos, resultantes de pesquisas de outros autores, mas, nenhuma destas, apresentava um conjunto de regras devidamente aprovadas pela comissão técnica, para que fosse possível avaliar a sua segurança, contudo, com a revisão do EC5 torna-se mais acessível as suas aplicações nas estruturas de madeira, um vez que, já se encontram definidas as exigências necessárias para se verificar a segurança da ligação e efetuar o devido dimensionamento da mesma.

Em suma, a revisão do Eurocódigo 5 oferece aos projetistas, não só uma vasta gama de ligadores para as estruturas de madeira, mas também várias expressões de cálculo, considerando os vários produtos que tem por base a madeira.

6.2 Desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido ao longo da dissertação representa uma pequena contribuição na área do dimensionamento das ligações do tipo cavilha. Deste modo, os trabalhos futuros podem-se desenvolver a fim de aumentar a informação acerca desta temática. Assim, saliento aqueles que considero de especial importância:

- Revisão e aplicação das fórmulas propostas e avaliar com maior precisão as suas alterações, do ponto de vista da resistência, ductilidade, aplicação e economia;
- Analisar o comportamento das ligações do tipo cavilha introduzidas com a revisão do Eurocódigo 5;
- Investigação sobre novas técnicas ou propostas de dimensionamento para ligações que ainda não estejam normalizadas;
- Ampliação da norma às várias ligações tradicionais;
- Aprofundar o tema relativo às cavilhas de madeira.

CAPÍTULO 7

7. Referências bibliográficas

- Almeida, F. A. L. (2012). *A madeira como material estrutural – Projeto da estrutura da cobertura de um edifício*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Alva, M. B. C. (2016). *Estudo Experimental de Nós de Pórticos de Madeira em Betão Armado Sujeitos à Flexão Simples*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- Anastácio, R. S. A. (2010). *Especificação De Protecção Fogo Para Estruturas de Madeira*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Barbosa, S., Branco, J. M., & Ferreira, F. (2017). Reforço de ligações tradicionais de madeira. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Série III, Vol. n.º3*. (pp. 21-34).
- Barbosa, S. I. F. (2015). *Reforço de ligações tradicionais de madeira*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.
- Bell, K. (2008). Worked examples. *Handbook 2 - Design of Timber Structures according to EC5*. (pp. 123–125). Leonardo da Vinci Pilot. Praga, República Checa.
- Branco, J. M., & Descamps, T. (2015). Analysis and strengthening of carpentry joints. *Construction and Building Materials* (Vol. 97), (pp. 34-47). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.089>
- Branco, J. M. G. (2003). *Comportamento Das Ligações Tipo Cavilha Em Estruturas Mistas Madeira – Betão*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.
- Costa, A. A. P. (2013). *Construção De Edifícios Com Cross Laminated Timber (CLT)*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coutinho, J. (1999). Madeiras. *Materiais de Construção 1: Apontamentos teóricos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Cruz, H., & Nunes, L. (2014). A madeira como material de construção. *Núcleo de Estruturas de Madeira*. LNEC, Lisboa.
- Custódio, J., Broughton, J., & Cruz, H. (2009). A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29, (pp. 173–185). <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002>
- EN 300:2006. *Oriented strand boards (OSB) - Definitions, classification and specifications*. CEN, Brussels.
- EN 338:2016. *Structural Timber - Strength classes*. CEN, Brussels.
- EN 355:2018. *Durabilidade da madeira e de produtos derivados de madeira. Classes de risco: definições, aplicação à madeira e a produtos derivados de madeira*. CEN, Brussels
- EN 460:1995. *Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes*. CEN, Brussels
- EN 10147:2000. *Continuously hot-dip zinc coated structural steels strip and sheet - Technical delivery conditions*. CEN, Brussels.
- EN 1194:1999. *Timber structures. Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values*. CEN, Brussels.
- EN 1995-1-1. (2004). *Eurocode 5: Design of timber structures*. CEN, Brussels.
- Ferreira, D. S. G. (2017). *Soluções construtivas em madeira: Aplicação a novas estruturas e reabilitação*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- Gonçalves, L. C. C. (2012). *Projeto de estruturas em Madeira Lamelada Colada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa.
- Green, D. W. (1999). *Wood Handbook - Wood as an engineering material*. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin.
- Hilário, R. S. M. O. (2013). *Dimensionamento de Estruturas em Madeira: Metodologia e disposições regulamentares relativamente a ligações*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica Lisboa.
- Kuklik, P. (2008). Connections with metal fasteners. *Handbook 1 - Timber Structures* (pp. 54–78). Leonardo da Vinci Pilot. Praga, República Checa.

- Larsen, H. J. (2010). *Dowel-type fasteners loaded parallel-to-grain*. CIB-W18, Nelson, New Zealand.
- LNEC E31:1995. *Terminologia de madeiras*. LNEC, Lisboa.
- LNEC M1:1997. *Especificação de madeiras para estruturas*. LNEC, Lisboa.
- Lourenço, P. B., & Branco, J. (2012). Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI. *História da Construção: Arquiteturas e Técnicas Construtiva*, (pp. 199–211). <http://hdl.handle.net/1822/26503>
- Luzio, M. A. M. (2011). *Verificação da segurança da estrutura de madeira de uma moradia - Estudo de caso*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Manfred, A. (2008). Ultimate Limit States - Joints. *Handbook 1 - Timber Structures* (pp. 138–157). Leonardo da Vinci Pilot Projects. Praga, República Checa.
- Martins, J., & Negrão, J. (2018). Determinação experimental da resistência de varões colados aplicados em madeira de castanho. Em *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*. (pp. 1–11) Cáceres, Espanha. <https://www.researchgate.net/publication/344450804>
- Martins, T. F. R. M. (2010). *Dimensionamento de Estruturas em Madeira -Coberturas e Pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa.
- NP EN 616:1973. *Madeiras. Determinação da massa volúmica*. IPQ, Portugal
- Palma, P. (2009). *Ligações Tradicionais em Estruturas de Madeira - Avaliação experimental do seu comportamento mecânico*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa.
- Palma, P., Kobel, P., Minor, A., & Frangi, A. (2014). Ligações Estruturais do tipo madeira-madeira com placas de madeira densificada e cavilhas de FRP. Em *5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, (pp. 1–18).
- Pina, C., & Pontífice, P. (2008). Eurocódigos Estruturais: Ponto da situação em Portugal. Em *BE 2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural*. pp.(69-78). Guimarães, Braga.
- Porteous, J., & Kermani, A. (2007). *Structural timber design to Eurocode 5*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, Reino Unido.
- prEN 1995-1-1. (2020). *Third draft of chapter Connections*. CEN, Brussels.

- Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, (pp. 333–359). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Silva, C., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2012). MLCC na construção em altura. Em *Congresso Construção 2012 - 4º Congresso Nacional*. (pp. 1–12). Coimbra, Portugal.
- Silva, J. M. C. (2014). *Potencialidades de Elementos Pré-fabricados de Madeira na Reabilitação*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.
- Smith, William F. (1990). *Principles of materials science and engineering*. McGraw-Hill International (ed.), 3ª Ed..
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O`Neill, C., McPolin, D., & Widmann, R. (2015). Reinforcement with glued-in rods. A. Harte & P. Dietsch (Eds.). *Reinforcement of Timber Structures* (pp. 133–159). COST - European Cooperation in Science and Technology.