



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

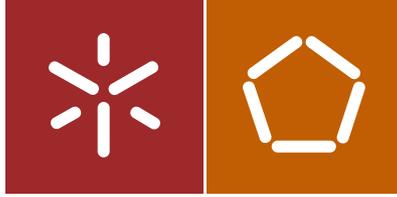
Sara Isabel Ferreira Barbosa

Reforço de ligações tradicionais de madeira

Sara Isabel Ferreira Barbosa Reforço de ligações tradicionais de madeira

UMinho | 2015

novembro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Isabel Ferreira Barbosa

Reforço de ligações tradicionais de madeira

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Manuel Branco
Eng. Filipe Ferreira (A.O.F)

Agradecimentos

A realização desta tese de dissertação, embora seja um trabalho do foro pessoal, teve a contribuição de inúmeras pessoas aos quais de seguida irei agradecer.

Ao meu orientador, professor Jorge Branco, o meu agradecimento pela partilha de conhecimentos, pela orientação e disponibilidade para levar a cabo a realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Eng. Filipe Ferreira, e aos colaboradores da A.O.F. agradeço o acompanhamento e ensinamentos partilhados na visita às obras com estruturas de madeira em reabilitação.

Pelo apoio prestado durante a realização do trabalho experimental, agradeço ao Karel Šobra e aos técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Civil. À empresa A.O.F. agradeço também o fornecimento das amostras e material de reforço das ligações ensaiadas.

Agradeço à Eng^a. Catarina Vilaça Silva pela sua ajuda e disponibilidade na transmissão de conhecimentos acerca dos programas Sketchup e CorelDRAW, necessários à realização dos esquemas presentes na tese.

Agradeço aos meus amigos e colegas de percurso por todos os momentos e conhecimentos partilhados ao longo do curso.

Quero agradecer também aos que me são mais próximos, amigos e familiares, pelo carinho e motivação demonstrado pelo trabalho por mim desenvolvido.

Aos meus pais e irmão, que acompanharam de perto a evolução do meu percurso, agradeço o apoio e ajuda prestada ao longo destes anos.

Por fim, agradeço de forma especial ao João Costa, pela sua amizade, incentivo e motivação na conclusão deste trabalho e ao longo de todo o percurso.

Resumo

As estruturas de madeira antigas são formadas por um conjunto de elementos, ligados entre si através de ligações tradicionais, onde as tensões são transmitidas através das superfícies de contacto. A concepção das ligações, que resultam do processamento das superfícies de contacto, implica, caso não haja ligadores metálicos que impeçam o desencaixe dos elementos ligados, que a ligação mantenha o estado de tensão nas superfícies em contacto para o qual foi dimensionada, de modo a garantir a integridade da ligação e da estrutura.

Existem diferentes tipologias de ligações tradicionais, que foram evoluindo com a complexidade das estruturas, as quais se podem enquadrar em quatro grupos: entalhes, empalmes, cruzamentos e acoplamentos. Os entalhes resultam da união de elementos de madeira em ângulo, através de um sulco em forma de “V” nas superfícies de contacto, com ou sem respiga. Os cruzamentos correspondem à união de dois elementos de madeira através do seu corte, garantindo que a espessura da ligação seja a mesma que a do membro com maior espessura, e sobreposição perpendicular ou oblíqua. Por sua vez, os empalmes resultam da união, topo a topo, de dois elementos de modo a aumentar o comprimento longitudinal do elemento. Por fim, o acoplamento corresponde à junção lateral de dois ou mais elementos de madeira de modo a aumentar a secção transversal.

A falta de conhecimento e a dificuldade em compreender o comportamento das ligações tradicionais existentes nas estruturas de madeira conduz, frequentemente, à substituição das estruturas de madeira ou a reforços excessivamente conservadores. É, portanto, crucial ter em conta o comportamento das ligações, nomeadamente os modos de rotura e patologias existentes, para proceder à sua reparação ou reforço. Além disso, tendo em conta a diversidade de técnicas de reforço, importa escolher e aplicar a que melhor se adequa à ligação em causa.

A campanha experimental realizada em ligações com dente simples teve como objetivo avaliar o comportamento da ligação e respectivo modo de rotura, à medida que o comprimento ia variando (diminuindo), dado que existe um comprimento mínimo abaixo do qual se podem desenvolver tensões de corte. Por fim, algumas das amostras foram reforçadas com parafusos auto-perfurantes, com o objetivo de prevenir o mecanismo de falha que dominou o comportamento das ligações sem reforço e avaliar o comportamento da ligação.

Palavras-chave: Ligações tradicionais de madeira; dimensionamento; patologias; reparação; reforço.

Abstract

The old timber frame is formed by a set of elements interconnected through traditional bonds, where the tensions are transmitted through contact surfaces. The design of traditional joints, which result from processing of the contact surfaces, means if there is no fasteners to prevent the undock of the elements, that the joint keep the state of tension in the contact surfaces for which was dimensioned to ensure the integrity of the connection and structure.

There are different types of traditional joints, which were evolving with the complexity of the structures, which fall into four groups: notched joints, lap joints, scarf joints and coupling joints. The notched joints correspond to the union of elements of wood at an angle, through a groove in the shape of a "V" in contact surfaces, with or without the tenon. The lap joints correspond to the union of two wood elements through its cut, ensuring that the thickness of the connection is the same as that of the state with the greatest thickness, and overlap perpendicular or oblique. In turn, the scarf joints result, end to end, the two elements in order to increase the longitudinal length of the element. Finally, the coupling joints correspond to the lateral joining of two or more wood elements in order to increase the cross section.

The lack of knowledge and difficulty to understand the behavior of the existing traditional joints in the timber structures, often leads to the replacement timber structures or excessively conservative reinforcements. It is therefore crucial to take into account the behavior of the joints, including the modes of failure and pathology existing, for its repair or reinforcement. Besides, taking into account the diversity of strengthening techniques, it is important to choose and apply that best fits the connection in question.

The experimental campaign realized in front notch joint had as objective to evaluate the behavior of the joint and its failure mode, as the length ranging (decreasing). Given the fact that there is a minimum length below which it can develop shear stresses. Finally, some of the samples were reinforced with self-tapping screws, with the objective of preventing the mechanism of failure that dominated the behavior of joints without reinforcement, changing the way of forces and to assess the behavior of the joint.

Keywords: Traditional joints of wood; sizing; pathologies; recovery; reinforcement.

Simbologia

Letras maiúsculas latinas

| | |
|------------|---|
| A_c | Área de compressão |
| A_{eff} | Área de influência de cada varão |
| A_{res} | Área resistente dos varões |
| V | Índice de ductilidade estático |
| F_d | Força |
| F_T | Força de tração |
| F_1 | Componente da força que atua na superfície frontal do entalhe; componente da força que atua na superfície posterior do entalhe |
| F_2 | Componente da força que atua perpendicularmente em relação à superfície do entalhe; componente da força perpendicular a F_1 |
| F_3 | Componente horizontal da força |
| F_4 | Reação do apoio |
| H | Força de compressão no lado da frente da respiga |
| N_d | Força de cada varão |
| M_{calc} | Momento de cálculo |
| Q | Força de corte na perna |
| $R_{v,d}$ | Valor de cálculo da capacidade resistente por plano de corte e por ligador |
| T_{calc} | Força admitindo uma distribuição triangular de carga devido ao esmagamento |
| V | Força de compressão na superfície inferior do entalhe |
| V_{sd} | Esforço transverso |

Letras minúsculas latinas

| | |
|------------------|--|
| b_c | Largura da chapa |
| b_i | Largura do elemento i |
| d | Comprimento da superfície comprimida posterior do entalhe; diâmetro |
| d_{eq} | Diâmetro equivalente |
| d_u | Deslocamento máximo |
| d_y | Deslocamento elástico |
| e | Comprimento do entalhe |
| $f_{ad,k}$ | Resistência característica ao corte na interface de ligação |
| $f_{c,0,d}$ | Valor de cálculo da resistência à compressão na direcção das fibras |
| $f_{c,90,d}$ | Valor de cálculo da resistência à compressão na direcção perpendicular às fibras |
| $f_{c,\alpha,d}$ | Valor de cálculo da resistência à compressão a um ângulo α em relação à direcção das fibras |
| $f_{t,0,d}$ | Valor de cálculo da resistência à tração na direcção das fibras |
| $f_{t,90,d}$ | Força de tração segundo a direcção perpendicular à direcção das fibras |
| f_u | Resistência à tração da chapa |
| $f_{v,d}$ | Valor de cálculo da resistência ao corte |
| $f_{y,k}$ | Resistência característica à tração do aço |
| h_i | Altura do elemento i |
| h_u | Distância entre varões |
| $i_{t,0}$ | Critério máximo de esgotamento por tração da secção total do entalhe |

| | |
|----------|---|
| k_e | Rigidez elástica |
| k_p | Rigidez plástica |
| l | Comprimento do plano de corte na direção das fibras |
| l_{ad} | Comprimento de ancoragem |
| l_c | Comprimento da chapa |
| l_v | Comprimento do talão |
| n_{ef} | Número efectivo de ligadores |
| t | Altura do batente |
| t_v | Profundidade do entalhe |
| t_x | Distância entre a superfície inferior e ponto de carregamento |

Letras minúsculas gregas

| | |
|---------------|--|
| α | Ângulo formado entre a direção da força e a direção das fibras |
| β | Ângulo formado entre as linhas centrais dos elementos que constituem a ligação |
| ε | Ângulo do entalhe |
| μ_i | Coefficiente de atrito da superfície de contacto i |

Siglas

| | |
|------|--|
| EC5 | Eurocódigo 5 |
| FRP | Polímeros reforçados com fibras |
| GFRP | Polímeros reforçados com fibras de vidro |
| LVDT | Linear Voltage Differential Transducers |

Índice

| | |
|---|------------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | v |
| Abstract | vii |
| Simbologia | ix |
| Índice | xi |
| Índice de figuras | xv |
| Índice de tabelas | xix |
| 1. Introdução, motivação e organização | 1 |
| 1.1.Introdução | 1 |
| 1.2.Motivação e objetivos do trabalho | 3 |
| 1.3.Organização do documento | 3 |
| 2. Ligações tradicionais de madeira | 5 |
| 2.1.Enquadramento histórico..... | 6 |
| 2.2.Requisitos das ligações tradicionais | 8 |
| 2.3.Tipologias de ligações tradicionais | 9 |
| 2.3.1. Entalhes..... | 10 |
| 2.3.2. Cruzamentos | 11 |
| 2.3.3. Empalmes | 12 |
| 2.3.3.1. Empalmes à compressão | 12 |
| 2.3.3.2. Empalmes à tração | 13 |
| 2.3.4. Acoplamentos | 14 |
| 2.4.Aplicações estruturais..... | 14 |
| 2.4.1. Asnas de madeira..... | 15 |
| 2.4.2. Paredes de madeira | 20 |
| 2.4.3. Pontes de madeira | 22 |
| 3. Dimensionamento de ligações tradicionais de madeira | 25 |
| 3.1.Ligações tradicionais por entalhes..... | 25 |
| 3.1.1.Dente simples e dente duplo | 26 |
| 3.1.1.1. Disposição geométrica | 26 |
| 3.1.1.1.1. Inclinação do entalhe | 26 |
| 3.1.1.1.2. Profundidade do entalhe | 29 |
| 3.1.1.1.3. Comprimento do talão | 30 |

| | |
|---|----|
| 3.1.1.1.4. Dimensões e forma da respiga | 31 |
| 3.1.1.2. Verificação da segurança..... | 32 |
| 3.1.1.2.1. Anexo Nacional Holandês do Eurocódigo 5 | 32 |
| 3.1.1.2.2. Norma Suíça SIA 265 (2012) e Espanhola DB-SE-M (2009) | 34 |
| 3.1.1.2.3. Norma Alemã DIN 1052 (2005) | 35 |
| 3.1.1.2.4. Thierry Descamps | 37 |
| 3.1.1.2.5. Documento de aplicación del CTE (Martitegui et al.,2013a; Martitegui et al.,2013b) | 39 |
| 3.1.2. Dente simples com respiga e mecha | 43 |
| 3.1.3. Considerações finais..... | 44 |
| 3.2. Cruzamentos..... | 49 |
| 3.2.1. Cauda de andorinha..... | 49 |
| 3.2.1.1. Disposição geométrica..... | 50 |
| 3.2.1.2. Verificação de segurança..... | 51 |
| 3.2.2. Meio fio de ponta | 53 |
| 3.2.2.1. Disposição geométrica..... | 54 |
| 3.2.2.2. Verificação de segurança..... | 54 |
| 3.2.3. Cruz a meio fio..... | 55 |
| 3.2.3.1. Disposição geométrica..... | 56 |
| 3.2.3.2. Verificação de segurança..... | 57 |
| 3.2.4. Meio fio de encontro | 57 |
| 3.2.4.1. Disposição geométrica..... | 58 |
| 3.2.4.2. Verificação de segurança..... | 58 |
| 3.2.5. Ligação em rebaixo | 59 |
| 3.2.5.1. Disposição geométrica..... | 60 |
| 3.2.5.2. Verificação de segurança..... | 60 |
| 3.3. Empalmes..... | 61 |
| 3.3.1. União a meio fio..... | 61 |
| 3.3.1.1. Disposição geométrica..... | 62 |
| 3.3.1.2. Verificação de segurança..... | 62 |
| 3.3.2. União com macho | 64 |
| 3.3.2.1. Disposição geométrica..... | 64 |
| 3.3.2.2. Verificação de segurança..... | 65 |
| 3.3.3. União com respiga e mecha | 65 |
| 3.3.3.1. Disposição geométrica..... | 66 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.3.2. Verificação de segurança | 66 |
| 3.3.4. União a meio fio com entalhe e entalhe a meia madeira | 68 |
| 3.3.4.1. Disposição geométrica | 69 |
| 3.3.4.2. Verificação de segurança | 70 |
| 3.3.5. Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria | 71 |
| 3.3.5.1. Disposição geométrica | 72 |
| 3.3.5.2. Verificação de segurança | 73 |
| 4. Reforço de ligações tradicionais de madeira | 75 |
| 4.1. Principais patologias que afetam a madeira | 75 |
| 4.1.1. Ação de agentes patológicos | 76 |
| 4.1.1.1. Fungos xilófagos | 76 |
| 4.1.1.2. Insetos de ciclo larvar | 77 |
| 4.1.1.2.1. Insetos sociais | 78 |
| 4.1.1.2.2. Xilófagos marinhos | 78 |
| 4.1.2. Ação de agentes abióticos | 78 |
| 4.1.2.1. Agentes atmosféricos | 79 |
| 4.1.2.2. Agentes químicos | 79 |
| 4.1.2.3. Fogo | 80 |
| 4.1.3. Anomalias estruturais | 80 |
| 4.1.3.1. Ligações tradicionais de madeira | 81 |
| 4.2. Intervenções de reparação e reforço das ligações tradicionais de madeira | 83 |
| 4.2.1. Intervenções de reparação das ligações | 85 |
| 4.2.2. Intervenções de reforço das ligações | 86 |
| 4.2.2.1. Reforço de ligações tradicionais com entalhes | 89 |
| 4.2.2.1.1. Reforço de ligações com respiga e mecha | 96 |
| 4.2.2.1.2. Reforço de ligações de dente simples com respiga e mecha | 99 |
| 4.2.2.2. Reforço de cruzamentos | 101 |
| 4.2.2.3. Reforço de empalmes | 105 |
| 5. Regras para reforço de ligações tradicionais de madeira | 109 |
| 5.1. Ligações tradicionais com entalhes | 110 |
| 5.2. Ligações com respiga e mecha | 114 |
| 5.3. Cruzamentos | 115 |
| 5.4. Empalmes | 117 |
| 6. Programa experimental sobre ligações com dente simples | 121 |
| 6.1. Caracterização da madeira e geometria da ligação | 122 |
| 6.2. Esquema de ensaio e instrumentação | 123 |

| | |
|---|------------|
| 6.3.Soluções de reforço estudadas | 124 |
| 6.4.Resultados dos ensaios | 125 |
| 6.4.1.Avaliação das soluções reforçadas | 129 |
| 6.4.2.Comparação dos valores teóricos e experimentais | 133 |
| 6.5.Conclusão | 134 |
| 7. Considerações finais e desenvolvimentos futuros | 137 |
| 7.1.Considerações finais | 137 |
| 7.2.Desenvolvimentos futuros..... | 140 |
| 8. Referências bibliográficas | 143 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Abrigos de madeira (120 000 a 40 000 a.C.) (Kuklík, 2008). | 7 |
| Figura 2 - Entalhes: a) Ligação com dente simples; b) Ligação com dente simples posterior; c) Ligação com dente duplo..... | 10 |
| Figura 3 – Ligações tradicionais por entalhes: a) Ligação com respiga e mecha; b) Ligação com dente simples, respiga e mecha..... | 11 |
| Figura 4 - Cruzamentos: a) Ligação de cauda de andorinha unilateral; b) Ligação de cauda de andorinha; c) Ligação cruz a meio fio; d) Ligação meio fio de encontro; e) Ligação meio fio de ponta. | 11 |
| Figura 5 - Ligação em rebaixo: a) reta b) oblíqua. | 12 |
| Figura 6 - Empalmes à compressão: a) União a meio fio; b) União a meio fio em viés; c) União com macho; d) União com respiga e mecha; e) União com dupla respiga e mecha. | 13 |
| Figura 7 - Empalmes à tração: a) União a meio fio; b) Entalhe com ângulo; c) União a meio fio com entalhe; d) Entalhe a meia madeira com batente; e) Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria (dentada); f) Entalhe com ângulo e dois batentes a meia esquadria (dentada); g) União com respiga e mecha. | 14 |
| Figura 8 - Acoplamentos: a) Acoplamento com batentes; b) Acoplamento dentado..... | 14 |
| Figura 9 – a) Asna simples reforçada com elementos metálicos; b) Asna composta reforçada com elementos metálicos (adaptado Appleton, 2008)..... | 16 |
| Figura 10 – Ligação linha-perna por meio de cruzamentos. | 16 |
| Figura 11 – Ligação linha-perna por meio de entalhes. | 17 |
| Figura 12 – Ligações tradicionais da ligação linha-perna: a) e b) ligações respiga e mecha; c) ligação cauda de andorinha (adaptado Jasienko et al.,2014)..... | 17 |
| Figura 13 – Ligações dos cumes da asna com recurso a entalhes (adaptado Jasienko et al.,2014)..... | 18 |
| Figura 14 – Ligações dos cumes da asna com recurso a cruzamentos (adaptado Jasienko et al.,2014)..... | 18 |
| Figura 15 – Empalmes de madeira para garantir a continuidade da linha (adaptado de Branco et al.,2008). | 19 |
| Figura 16 – Ligações de apoio da perna. | 19 |
| Figura 17 – Exemplos de construção de paredes em madeira: a) paredes de frontal pombalina construída em Lisboa (Poletti, 2013); b) Construção típica enxaimel em Sindelfinge, Baden-Württemberg, Alemanha (Poletti, 2013). | 20 |
| Figura 18 – Exemplos das ligações usadas nas paredes de frontal pombalina (Mascarenhas, 2004)..... | 21 |
| Figura 19 – Exemplos de ligações na construção de paredes em edifícios históricos na Polónia: a) cruzamentos; b) ligação com saliência cauda de andorinha (Jasienko et al., 2014). | 21 |
| Figura 20 – Ponte de Cesar de acordo com Palladio (Ritter, 1990). | 22 |
| Figura 21 – Exemplo de ligações tradicionais usadas na construção de uma ponte (Pierce et al., 2005)..... | 23 |
| Figura 22 - Ligações por entalhe: a) dente simples; b) dente simples posterior; c) dente duplo. | 25 |
| Figura 23 - Ângulo definido entre as fibras e a força de compressão axial. | 27 |
| Figura 24 - Ângulo definido entre as fibras e a força de compressão axial. | 28 |
| Figura 25 – Ligação de dente simples posterior com uma folga entre a face superior da linha e perna. | 28 |
| Figura 26 – Exemplos de ligações de dente simples posterior. | 29 |
| Figura 27 - Superfície de corte no talão. | 30 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 - Dente simples anterior com respiga e mecha..... | 31 |
| Figura 29 - Esquema de distribuição das forças, segundo Anexo Nacional Holandês do EC5. | 33 |
| Figura 30 - Esquema de distribuição das forças, segundo a norma Suíça e Espanhola..... | 34 |
| Figura 31 - Esquema de distribuição das forças, segundo a norma alemã DIN 1052 (2005).. | 36 |
| Figura 32 - Esquema de distribuição das forças (adaptado de Descamps ¹)..... | 37 |
| Figura 33 - Mecanismos de distribuição da força: a) dente simples; b) dente simples posterior (Descamps)..... | 38 |
| Figura 34 - Mecanismo de rotura por compressão na linha: a) dente simples; b) dente simples posterior. | 39 |
| Figura 35 - Mecanismos de distribuição da força num dente simples. | 40 |
| Figura 36 - Distribuição das forças pelas superfícies dos entalhes num dente duplo. | 41 |
| Figura 37 - Distribuição das forças pelas superfícies dos entalhes num dente duplo com ângulos retos nos entalhes..... | 42 |
| Figura 38 - Área de corte de uma ligação cuja linha tem maior largura (b_2) do que a perna (b_1)..... | 43 |
| Figura 39 - Configuração e mecanismo de distribuição das forças numa ligação de dente simples com respiga e mecha (adaptado de Branco et al.,2015)..... | 43 |
| Figura 40 - Representação da ligação e respectivo modelo: a) ligação escora-pendural; b) ligação escora-perna; c) ligação perna-pendural..... | 47 |
| Figura 41- Comparação da valor f_c, α, d segundo as diferentes normas, admitindo que $f_c, 0, d = 20 \text{ N/mm}^2$; $f_c, 90, d = 2,5 \text{ N/mm}^2$; $k_c, 90 = 2$ | 48 |
| Figura 42 - Ligações de cauda de andorinha: a) unilateral; b) bilateral..... | 49 |
| Figura 43 - Regras geométricas para a cauda de andorinha: a) unilateral; b) bilateral. | 50 |
| Figura 44 - Ligação de cauda de andorinha sujeita a esforços de tração, compressão ou corte. | 51 |
| Figura 45 - Modos de rotura da ligação cauda de andorinha: 1) corte na direção das fibras; 2) tração paralela às fibras; 3) tração perpendicular às fibras. | 52 |
| Figura 46 - Ligação meio fio de ponta..... | 53 |
| Figura 47 - Ligação meio fio de ponta solicitada à compressão ou à tração. | 55 |
| Figura 48 - Ligação cruz a meio fio..... | 55 |
| Figura 49 - Ligação cruz a meio fio com superfície dentada..... | 55 |
| Figura 50 - Cruz a meio fio solicitada à compressão ou tração. | 56 |
| Figura 51 - Ligação meio fio de encontro..... | 57 |
| Figura 52 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação meio fio de encontro..... | 58 |
| Figura 53 - a) Ligação em rebaixo; b) Ligação em rebaixo inclinada. | 59 |
| Figura 54 - Ligação em rebaixo solicitada à tração. | 60 |
| Figura 55 - Ligação de união a meio fio sujeita a esforços de: a) compressão (pilar); b) tração (tirante)..... | 61 |
| Figura 56 – União a meio fio sujeita a esforços transversos. | 61 |
| Figura 57 - União a meio fio sujeita a esforços de tração..... | 62 |
| Figura 58 - União a meio fio sujeita a esforços de compressão..... | 63 |
| Figura 59 – a) União com macho; b) União com macho falso. | 63 |
| Figura 60 - União com respiga e mecha sujeito a: a) esforços de compressão; b) esforços de tração..... | 65 |
| Figura 61 - União com respiga e mecha sujeita a esforços de compressão. | 66 |
| Figura 62 - União com respiga e mecha sujeita a esforços de tração. | 67 |
| Figura 63 – União a meio fio com entalhe..... | 67 |
| Figura 64 - Entalhe a meia madeira. | 68 |

| | |
|---|-----|
| Figura 65 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação da união a meio fio com entalhe. | 70 |
| Figura 66 - Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria. | 70 |
| Figura 67 - Entalhe com ângulo e dois batentes a meia esquadria. | 70 |
| Figura 68 - Definição da geometria do entalhe com ângulo e batente a meia esquadria. (Montero, 1990). | 71 |
| Figura 69- Definição da geometria do entalhe com ângulo e com duplo batente a meia esquadria (Montero, 1990). | 72 |
| Figura 70 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação de entalhe com ângulo e com batente a meia esquadria. | 73 |
| Figura 71 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação de entalhe com ângulo e com duplo batente a meia esquadria. | 73 |
| Figura 72- Ataque da madeira por fungos xilófagos: a) podridão branda; b) podridão parda; c) podridão branca. | 77 |
| Figura 73- Secção de um elemento de madeira exposto ao fogo durante 30 minutos (Pereira, 2009). | 80 |
| Figura 74 - Intervenções de reparação das entregas com recurso a empalmes. | 86 |
| Figura 75 - Rigidificação de uma ligação originalmente semi-rígida (Piazza, 2004). | 86 |
| Figura 76 - Comportamento das ligações tradicionais de madeira definidas como um conjunto de molas equivalentes (Branco et al., 2015). | 87 |
| Figura 77 - Cunhas de madeira para colmatar as folgas: a) superfície frontal do entalhe; b) superfície mais longa do entalhe. | 89 |
| Figura 78 – Reforço de ligações com entalhe: a) parafusos auto-perfurantes; b) prótese de madeira aparafusada. | 90 |
| Figura 79 – Reforço de ligações com entalhes com braçadeira. | 90 |
| Figura 80 - Soluções de reforço: a) esquadro; b) varão interno; c) braçadeira rígida; d) braçadeira. | 92 |
| Figura 81 – Curvas médias de força-deslocamento de ligações não reforçadas e reforçadas, obtidas a partir de ensaios monotónicos ($\sigma_c = 30\text{MPa}$) (Branco, 2012). | 93 |
| Figura 82 – Reforço de ligações com entalhes com recurso a: a) varão interno; b) dois varões internos. | 93 |
| Figura 83 – Ligação com ângulo de abertura de 30° reforçada com: a) uma manta de CFRP de 10 cm; b) duas mantas de CFRP de 5 cm. | 94 |
| Figura 84 – Método adesivo: inserção de elementos de reforço. | 95 |
| Figura 85 – Reforço com aplicação de gussets. | 96 |
| Figura 86 - Modo de falha com pino de madeira (Harris et al., 2014). | 96 |
| Figura 87 - Teste de foto-elasticidade de uma ligação respiga e mecha: a) pino de madeira; b) pino de aço; c) sem pino (Jankowski et al., 2005). | 97 |
| Figura 88 – Adição de uma cavilha de encaixe na ligação. | 98 |
| Figura 89 – Reforço de uma ligação de respiga e mecha com recurso a braçadeira. | 98 |
| Figura 90 - Reforço de uma ligação de respiga e mecha com recurso a cabos de aço (Branco et al., 2015). | 99 |
| Figura 91 – Reforço por interposição de várias camadas de laminado de FRP. | 99 |
| Figura 92 - Comparação entre testes de dente simples e dente simples com respiga e mechas com teor em água de: a) 12%; b) 20% (Palma et al., 2007). | 100 |
| Figura 93 - Falha da respiga ao fechar o ângulo de inclinação (Palma, et al., 2007). | 100 |
| Figura 94 - Padrões de falha da ligação de dente simples com respiga e mecha são: a) colapso da ligação por compressão, com distribuição uniforme dos danos ao longo do comprimento de contacto (Feio et al., 2008; Feio et al., 2014); b) colapso da ligação por compressão, com | |

| | |
|---|-----|
| saliência para fora do plano (Feio et al., 2014); c) falha combinada em compressão e corte paralelo às fibras na respiga (Feio et al., 2014). | 101 |
| Figura 95 – Identificação das zonas transportadoras de carga de uma ligação sujeitas a esforços de: a) tração; b) compressão. | 102 |
| Figura 96 - Ligação reforçadas com: a) chapas metálicas; b) mantas de GFRP..... | 102 |
| Figura 97 - Ligação reforçadas com parafusos auto-perfurantes..... | 103 |
| Figura 98 – Resultados força- deslocamento de ligações reforçadas (Poletti et al., 2014).... | 103 |
| Figura 99 – Adição de um dente na superfície de entalhe da ligação a meio fio de ponta. ... | 104 |
| Figura 100 – Reforço ao corte com parafusos totalmente auto-perfurantes. | 104 |
| Figura 101 – Empalmes reforçados. | 105 |
| Figura 102 – Reforço de empalmes: a) parafusos auto-perfurantes; b) placas de metal. | 106 |
| Figura 103 – Empalmes reforçados por cintagem. | 106 |
| Figura 104 – Reforço ao corte de uma ligação com dente simples..... | 111 |
| Figura 105 – Mecanismo de distribuição das forças num sistema de reforço com recurso a cabos de aço. | 112 |
| Figura 106 – A capacidade resistente do reforço das cavilhas afixadas na chapa paralela à perna mais capacidade resistente da madeira deve ser superior à força axial de compressão. | 113 |
| Figura 107 - Reforço da ligação com uma braçadeira em forma de U. | 114 |
| Figura 108 – Reforço com parafuso auto-perfurante inclinado em relação às fibras. | 115 |
| Figura 109 - Reforço da ligação com duas chapas metálicas em forma de T. | 116 |
| Figura 110 - Cauda de andorinha: a) modos de rotura; b) reforço com parafusos auto-perfurantes..... | 116 |
| Figura 111 - Reforço da ligação com uma braçadeira em forma de U. | 117 |
| Figura 112 – Ligação sujeita a tensões perpendiculares às fibras com auto- perfurantes provocadas pelo esforço transversal: a) modo de rotura; b) reforço..... | 118 |
| Figura 113 – Empalmes reforçados com varões de aço inseridos em negativos executados na ligação. | 118 |
| Figura 114 – Mecanismo de distribuição das forças..... | 120 |
| Figura 115 – Definição dos parâmetros geométricos..... | 123 |
| Figura 116 – Esquema de ensaio: a) Teste solicitado apenas à compressão; b) Teste solicitado à compressão e ao corte; c) Alçado do ensaio. | 124 |
| Figura 117 – Reforço das ligações tradicionais de dente simples com parafusos auto-perfurantes: a) ensaio 1; b) ensaio 4; c) ensaio 5. | 125 |
| Figura 118 - Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios monotónicos. | 126 |
| Figura 119 - Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios monotónicos. | 126 |
| Figura 120 – Aplicação da lei bi-linear à curva força-deslocamento. | 128 |
| Figura 121 – Ligação reforçada com 4 parafusos auto-perfurantes: a) gráfico força-deslocamento da ligação sem reforço e com reforço; b) modo de falha da ligação reforçada. | 130 |
| Figura 122 - Ligação reforçada com 2 parafusos auto-perfurantes: a) gráfico força-deslocamento da ligação sem reforço e com reforço; b) modo de falha da ligação reforçada. | 131 |
| Figura 123 - Ligação reforçada com 4 parafusos auto-perfurantes: a) gráfico força-deslocamento da ligação sem reforço e com reforço; b) modo de falha da ligação reforçada. | 132 |

Índice de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Definição da profundidade do entalhe de acordo com as diferentes normas: Suíça (SIA 265, 2012), Alemã (DIN 1052, 2005), Espanhola (DB-SE-M, 2009), Italiana (CNR-DT 206, 2007) e Holandesa (NEN 3852, 1973; NEN 6760, 2005)..... | 29 |
| Tabela 2 - Definição da profundidade do entalhe t_{v1} | 30 |
| Tabela 3 - Regras geométricas do comprimento do talão para dente duplo..... | 31 |
| Tabela 4 - Equações de dimensionamento do dente simples e duplo, segundo Anexo Nacional Holandês do EC5 (NEN-EN 1995-1-1, 2013)..... | 33 |
| Tabela 5 - Regras Nacionais para a definição da geometria das ligações entalhadas. | 45 |
| Tabela 6 - Pré-dimensionamento da união a meio fio com entalhe definida por Martitegui et al. (2013a)..... | 69 |
| Tabela 7 – Valor de fad. k tendo em conta o comprimento de ancoragem. | 119 |
| Tabela 8 – Tipos de ensaios realizados no estudo experimental. | 122 |
| Tabela 9 - Parâmetros geométricos de cada ensaio, em mm. | 123 |
| Tabela 10 – Resultados dos ensaios experimentais. | 127 |
| Tabela 11 – Rigidez elástica (k_e), rigidez pós-elástica (k_p), deslocamento elástico (d_y) deslocamento máximo (d_u) e índice de ductilidade estático (D) dos ensaios monotónicos. .. | 129 |
| Tabela 12 – Comparação da Rigidez elástica (k_e), rigidez pós-elástica (k_p), deslocamento elástico (d_y) deslocamento máximo (d_u), índice de ductilidade estático (D) e capacidade de carga máxima ($F_{d,máx}$) dos ensaios monotónicos de ligações com e sem reforço..... | 132 |
| Tabela 13 – Cargas (F_d) condicionantes que conduzem à rotura, em kN..... | 133 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E ORGANIZAÇÃO

1.1. Introdução

Em termos históricos, a utilização da madeira, particularmente em estruturas, é rica e diversificada. Na Idade Média e ao longo dos séculos XVI, XVII e XVIII, o conhecimento adquirido sobre as características da madeira e sobre o comportamento das estruturas, permitiu realizar verdadeiras obras de arte, que vão desde as primeiras fortificações, aos edifícios religiosos e às habitações.

Nos dias de hoje, as novas construções em madeira surgem ao nível das coberturas de polidesportivos, salas de espetáculos e piscinas (Branco, 2003). E funcionam como um meio de divulgar as potencialidades estruturais, arquitectónicas e estéticas da madeira.

Em Portugal, o uso da madeira como elemento estrutural vem desde os primórdios dos tempos, dado que se trata de um material leve, fácil de manusear, sustentável e esteticamente apazível. Contudo, hoje em dia, essas estruturas de madeira apresentam alguns problemas que resultam da falta de manutenção apropriada, dos defeitos de projecto e/ou construção, da decadência do material, da mudança de uso da construção, etc.

Os principais problemas de instabilidade, em estruturas de madeira, surgem nas ligações entre os elementos estruturais e representa uma taxa de incidência de 80% (Itany et al.,1984). Assim sendo, conclui-se que num projecto de estruturas de madeira, o aspeto mais crítico são

as ligações entre elementos estruturais, dado que estão sujeitas a esforços e tensões localizadas e resulta na redução da resistência global da estrutura.

Ao longo dos tempos foram desenvolvidas diversas técnicas de ligações em madeira. Sendo que as ligações tradicionais de madeira-madeira tem evoluído até aos dias de hoje. Estas ligações inicialmente tinham apenas a função de travar a estrutura e não resistiam a esforços significativos. Contudo, com passar do tempo, foram surgindo ligações cada vez mais arrojadas e capazes de vencerem grandes vãos.

As ligações tradicionais de madeira transmitem os esforços por contacto direto e atrito. Sendo que, nos entalhes, o descarregamento dos elementos de compressão pode levar à desconexão da ligação e, em condições extremas, ao colapso da estrutura. Os ligadores metálicos, quando presentes, apenas desempenham a função de assegurar a ligação e impedir que esta se desloque para fora do plano da ligação.

Estas ligações foram construídas com base em conhecimentos empíricos, sem o apoio de conhecimentos experimentais e analíticos suficientes. Assim, em qualquer uma destas estruturas de madeira, não é possível garantir os níveis de segurança actualmente imposto, nem estabelecer com rigor a capacidade resistente das ligações (Parisi et al., 2008).

Portanto, a ideia de que as estruturas antigas são garantia de qualidade é errada, dado que estão associadas a um elevado grau de improvisação, erros de dimensionamento e concepção, execuções com baixo rigor e inúmeras intervenções pontuais sem consideração dos níveis de segurança.

A falta de rigor na execução das ligações, associada à retração da madeira, leva à existência de folgas entre elementos que reduzem substancialmente a rigidez e resistência das ligações entre os elementos. Assim sendo, uma das formas de garantir a estabilidade da ligação é o uso de técnicas de reforço.

Tradicionalmente, o reforço das ligações é realizado através da adição de elementos metálicos (estribos, esquadros, varões, parafusos, etc.) ou de madeira, cuja função é garantir a funcionalidade da ligação sob condições incomuns, prevenir a degradação da resistência da ligação e evitar a perda de contacto entre os elementos ligados. Contudo, existem técnicas mais inovadoras que envolvem a aplicação de materiais compósitos, em particular os polímeros reforçados com fibras de vidro.

1.2. Motivação e objetivos do trabalho

As técnicas de reforço das ligações tradicionais são baseadas em conhecimentos empíricos, dado que ainda não existem normas/regras para o seu dimensionamento, execução e monitorização. O reforço com bases heurísticas podem não ser totalmente eficazes e, em caso de actividade sísmica, podem ter efeitos colaterais devido ao aumento excessivo de força e rigidez (Parisi et al., 2008). Daí a necessidade, cada vez maior, de se investir numa investigação específica, de modo a compreender os mecanismos e factores que influenciam o comportamento global das ligações tradicionais de madeira.

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos algumas campanhas experimentais com vista a estudar e avaliar o comportamento das ligações tradicionais de madeira quando reforçadas com elementos metálicos ou materiais compósitos (Branco, 2012; Branco et al., 2008; Parisi et al., 2008; Poletti et al., 2014). No entanto, ainda não existem bases analíticas para o dimensionamento dessas soluções de reforço. Assim sendo, este trabalho visa colmatar a informação em falta no Eurocódigo 5 (EC5) no âmbito do reforço de ligações tradicionais em madeira. E tem como principais objetivos avaliar as principais anomalias existentes nas ligações, avaliar as técnicas de reforço comumente usadas no seu reforço e definir regras e modelos de dimensionamento do reforço de ligações, de forma a evitar intervenções excessivamente conservadoras, ao qual estão associadas custos exagerados.

1.3. Organização do documento

O presente documento encontra-se dividido em 7 capítulos, descrevendo-se em seguida o conteúdo de cada um deles.

O capítulo 1 apresenta a introdução, a motivação e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica sobre as ligações tradicionais de madeira e divide-se em quatro subcapítulos. No primeiro é abordado o enquadramento histórico das estruturas de madeira e das ligações tradicionais, dado que a evolução das estruturas de madeira está intimamente relacionado com a evolução das ligações tradicionais. No segundo subcapítulo, são apresentados alguns dos requisitos associados às ligações tradicionais, para que estas possam garantir a estabilidade e segurança da estrutura. Por sua vez, no terceiro, são apresentadas as diferentes tipologias de ligações associadas aos quatro grupos de ligações

tradicionais: entalhes, empalmes, cruzamentos e acoplamentos. Por fim, são apresentadas as aplicações das ligações tradicionais ao nível das diferentes estruturas de madeira.

No capítulo 3, tendo em conta as ligações tradicionais mais comuns, é apresentado para cada uma delas algumas regras geométricas e de dimensionamento para a sua conceção.

O capítulo 4 encontra-se dividido em dois subcapítulos. O primeiro referente às principais patologias que afetam a madeira, destacando-se as anomalias/problemas que atingem as ligações tradicionais de madeira. Por sua vez, no segundo subcapítulo são abordadas formas de intervir nas ligações, tendo em conta a necessidade de reparação ou reforço.

No capítulo 5 são apresentadas algumas regras para a conceção e dimensionamento de diferentes soluções de reforço, tendo em conta o problema que afeta a ligação.

O capítulo 6 aborda o programa experimental realizado em ligações tradicionais de dente simples ensaiadas à compressão. Também é apresentada uma análise do comportamento das ligações ao qual se fez variar o comprimento do talão e, posteriormente, das ligações reforçadas com parafusos auto-perfurantes. É ainda apresentada uma comparação entre os valores teóricos, referentes a normas e considerações de alguns autores, e valores experimentais.

Por último, no capítulo 7 são apresentadas todas as considerações finais sobre o trabalho efectuado ao longo da tese e alguns trabalhos futuros na perspectiva de dar continuidade ao estudo do reforço das ligações tradicionais de madeira.

Capítulo 2

LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA

No projeto de estruturas de madeira, as ligações entre elementos estruturais desempenham um papel muito importante e regulam a facilidade de manutenção, desempenho e durabilidade (Snow et al., 2006). As ligações correspondem a zonas críticas da estrutura dado que estão sujeitas a tensões localizadas pelo que requerem especial cuidado de modo a não por em causa a estabilidade global da estrutura. O desempenho das ligações é condicionado pela espécie da madeira, teor de água, qualidade de fabrico, existência de defeitos na madeira, entre outros fatores.

As ligações tradicionais de madeira transmitem os esforços por contacto direto e atrito entre as superfícies de contacto e/ou por meio de ligadores metálicos (por exemplo, parafusos, varões, braçadeiras, chapas de aço exteriores, etc.). Os ligadores metálicos, quando presentes, não transmitem diretamente os esforços, apenas permitem manter a funcionalidade da ligação sob ações horizontais, garantindo o desempenho da ligação quando sujeito a cargas cíclicas e impedindo que esta se desloque para fora do seu plano (Parisi et al., 2008). Em certos caso, e com o objetivo de aumentar a capacidade de carga da ligação, colocam-se ligadores metálicos de forma a reduzir as tensões instaladas nos elementos de madeira. No entanto, existem ligações em que apenas os ligadores metálicos garantem a transmissão de esforços.

Nas estruturas de madeira, as ligações tradicionais de madeira são fundamentalmente um trabalho de carpintaria, pelo que a precisão de corte do entalhe é fundamental, tendo influência na rigidez e resistência da ligação. Contudo, em serviço, com o natural envelhecimento da madeira, é comum ocorrer deformação e retração dos elementos estruturais que compõem a ligação, o que influencia significativamente o comportamento da ligação.

No desenho das ligações tradicionais de madeira é necessário compreender o equilíbrio global da estrutura, identificar todas as zonas críticas e verificar a sua capacidade resistente (compressão, corte, entre outros) nas várias direcções, dado que a natureza da madeira é anisotrópica o que faz com que o seu comportamento seja diferente de acordo com a direcção das fibras. Na direcção perpendicular às fibras, a madeira apresenta baixa resistência e quando tracionada nesta direcção, a rotura é frágil. Neste tipo de rotura as fibras tendem a separar-se, afetando a integridade estrutural da ligação.

No dimensionamento das ligações de madeira é necessário ter em conta as forças atuantes, rigidez da ligação e dos elementos, o modo de rotura, fatores ambientais (humidade e resistência ao fogo), excentricidade da ligação e repercussões que a ligação vai ter no material. O teor de água da madeira é um fator extremamente importante, uma vez que as variações de volume da madeira podem inviabilizar o comportamento da ligação.

Dependendo da natureza e nível das tensões atuantes, existe uma série de ligações tipo. Contudo, o bom funcionamento da ligação depende não só da tipologia, mas também da forma como a ligação é executada.

Neste capítulo, é abordada a forma como a evolução das estruturas em madeira influenciou também a evolução das ligações tradicionais, os requisitos das ligações (em termos de deformação plástica, rigidez, ductilidade e transmissão de esforços), os tipos de ligações tradicionais e respectivos grupos e, por fim, a aplicação dos diferentes tipos de ligações às estruturas.

2.1. Enquadramento histórico

Em termos históricos, a utilização da madeira para conceber estruturas de madeira, vem desde os primórdios da humanidade e, permitiu criar estruturas ricas e diversificadas. Associados à evolução das estruturas de madeira estão intimamente relacionados os tipos de ligação entre os diferentes elementos de madeira, de forma a permitir o desenvolvimento de estruturas mais complexas e de maiores dimensões, e as técnicas de trabalhar a madeira, o qual evoluiu de um

processo manual e primitivo para um processo mecânico/industrializado hábil e moderno (Lourenço et al., 2012).

As primeiras estruturas de madeira surgem quando o homem primitivo (pré-história) decidiu edificar abrigos sob a forma de cabanas (Figura 1), no qual as varas inclinadas, com forma arredonda, eram dispostas de forma a cruzarem-se no topo e cravadas no solo. A utilização deste tipo de estrutura cria a necessidade de uma ligação para unir os elementos de madeira. Primeiramente, a ligação era efectuada com recurso a materiais fibrosos de origem vegetal (lianas, vimes) e posteriormente recorreu-se a tiras de pele de animais.

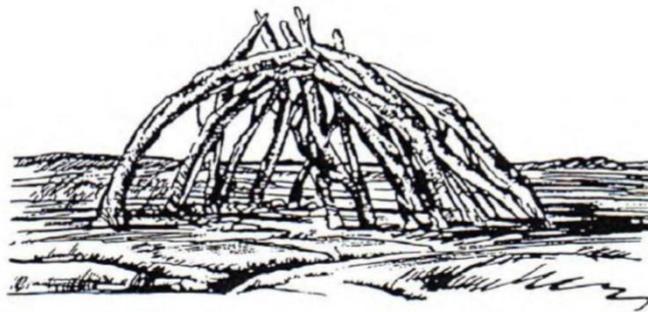


Figura 1 – Abrigos de madeira (120 000 a 40 000 a.C.) (Kuklík, 2008).

Contudo, a necessidade de criar estruturas mais resistente, associado ao desenvolvimento de ferramentas (Idade do Bronze) que permitiam a moldagem da madeira por parte do homem, levou ao aparecimento dos primeiros entalhes resultantes do uso de cortes para criar superfícies lisas, abandonando a configuração redonda dos troncos, e ao desenvolvimento do conhecimento acerca do comportamento dos elementos de madeira segundo a direcção das fibras.

As ligações por entalhes inicialmente concebidas tinham apenas a função de garantir o travamento da estrutura, transmitindo os esforços por contacto. Contudo, o desenvolvimento das ligações tradicionais e do conhecimento empírico sobre as características da madeira permitiu, entre a idade Média e os séculos seguintes, a criação de estruturas cada vez mais robustas. Sendo que a Idade Moderna esteve associada à construção em altura e à construção de paredes usando o processo de triangulação, usado para ligar elementos de madeira horizontais e verticais por meio de uma diagonal.

As ligações por entalhes evoluíram ao longo dos tempos, desde ligações primitivas, respiga e mecha, a ligações mais arrojadas, nomeadamente, dente simples, dente simples posterior e dente duplo. E representam, ainda hoje, uma das formas mais simples e eficazes de ligar dois elementos de madeira (Lourenço et al., 2012).

As primeiras ligações de respiga e mecha foram encontradas na cidade do Castelo, em Radzim, século IX e X (Jasienko et al., 2014). Posteriormente, entre o século XIII e XVII, com o desenvolvimento das estruturas dos telhados, nomeadamente com os telhados góticos e cúpulas barrocas, houve a necessidade de usar novas ligações. Registando-se no século XIII, as primeiras casas de madeira cujos elementos eram ligados com recurso a ligações de respiga e mecha, reforçadas com cunhas de madeira, ligações com dente e cruzamentos, nomeadamente a cauda de andorinha. No século XVI, na Igreja de St. Jacob, em Torun, a estrutura do telhado incluía ligações de dente com respiga em forma de cauda de andorinha (Jasienko et al., 2014). Por sua vez, no século XVII, em Plymouth, foram encontradas na Harlow Old Fort House empalmes de elementos de madeira reutilizados (Sobon, 2002).

Nos séculos seguintes, o foco centrou-se em estruturas de telhados com maior extensão e em forma de arco (Jasienko et al., 2011). O facto de serem necessários vários elementos de madeira, levou à necessidade de usar várias ligações, surgindo assim a necessidade de recorrer a cavilhas metálicas para garantir a ligação dos elementos e estabilidade da estrutura.

Mais tarde, com o aperfeiçoar das técnicas e com a necessidade de reforçar as ligações existentes e melhorar a rigidez e a resistência, surgem novas ligações a partir das existentes (ex. dente simples dá origem ao dente simples com respiga e mecha; o empalme a meio fio com entalhe dá origem ao empalme a meia madeira, etc).

Com a revolução Industrial, que teve início no século XVIII, inicia-se o uso das ligações metálicas na materialização de estruturas de madeira. Abandonando-se assim o uso das ligações tradicionais, muito por estas exigirem mão-de-obra minuciosa e demorada, ao contrário das ligações metálicas que permitem uma rápida execução.

Atualmente, as estruturas de madeira voltam a estar em voga, não só na construção nova como na reabilitação de estruturas existentes.

2.2. Requisitos das ligações tradicionais

Nas construções em madeira, a ductilidade da estrutura, que corresponde à capacidade desta se deformar sem reduzir substancialmente a sua resistência sísmica (Branco, 2008), é garantida pela deformação plástica das ligações.

A madeira possui, em geral, um comportamento frágil, principalmente em tracção perpendicular e corte paralelo às fibras, o que condiciona o desempenho mecânico das ligações. Contudo, a ductilidade das ligações tradicionais pode ser assegurada através da

utilização de elementos metálicos, aumentando a capacidade de redistribuição de esforços e a criação de novos caminhos de carga. Além disso, os elementos metálicos também previnem possíveis inversões de esforços, que correspondem a uma limitação na utilização de ligações tradicionais, pois geralmente só acomodam esforços num determinado sentido.

Ehlbeck e Kromer (1995) afirmam que “as ligações são normalmente modeladas como ligações perfeitas ou, onde uma rigidez de rotação é necessária para equilíbrio, uma transmissão de momento é assumida por completo”. Na prática, as ligações tradicionais de madeira raramente se modelam e quando isso acontece, assume-se as ligações como rígidas ou rotuladas (Branco et al., 2015). Contudo, na presença de cargas assimétricas (vento, neve, sismo), a rigidez das ligações podem desempenhar um papel condicionante.

A suposição de ligações rígidas é conservadora, uma vez que as deformações e as resistências máximas são menores daquelas que realmente se verificam. Na realidade, nas antigas estruturas de madeira, as ligações apresentam ductilidade permitindo rotação.

A concentração de tensões nas superfícies dos entalhes das ligações tradicionais leva a que se gerem modos de rotura por compressão, corte e tração. Como os elementos de madeira possuem um comportamento frágil, é ao nível das ligações que se pretende que haja dissipação de energia através do seu comportamento plástico (Cruz et al., 2006). A dissipação de energia aliada às deformações que antecedem a rotura, estão associados a modos de rotura com elevada ductilidade. Esta situação é a mais desejável, uma vez que os modos de rotura funcionam como sinal de alerta do estado da estrutura.

2.3. Tipologias de ligações tradicionais

As estruturas históricas de madeira são constituídas por vários tipos de ligações, que resultam da experiência e conhecimento adquirido ao longo do tempo. Estas ligações tradicionais apresentam diversas tipologias, que variam de região para região, podendo ser classificadas de acordo com a geometria dos elementos ligados e o modo como ocorre a transmissão de esforços. Assim sendo, existem quatro grupos de ligações tradicionais: entalhes, cruzamentos, empalmes e acoplamentos.

Atendendo à diversidade de ligações existentes e ao facto de algumas delas resultarem do aperfeiçoamento das ligações tipo, apenas serão apresentadas e estudadas as principais tipologias de ligações.

2.3.1. Entalhes

O entalhe corresponde à união de dois ou mais elementos de madeira em ângulo. Neste tipo de ligação as forças de compressão são transmitidas por contacto na superfície do entalhe. A superfície de entalhe forma um sulco em forma de “V”, chamado dente, que se desenvolve ao longo de toda a largura da peça (não há enfraquecimento da secção). Dependendo da forma do entalhe, é possível classificar o entalhe em dente simples, executado na parte posterior ou anterior da interface entre os elementos, dente duplo ou ligação com respiga e mecha (Figura 2).

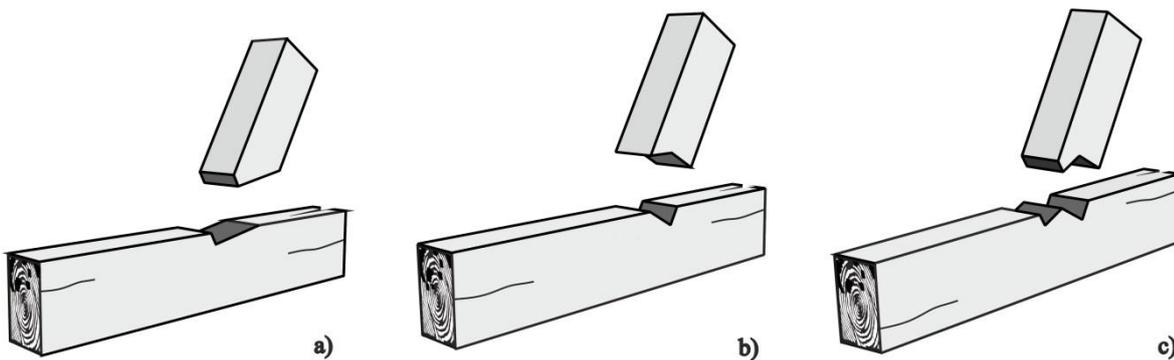


Figura 2 - Entalhes: a) Ligação com dente simples; b) Ligação com dente simples posterior; c) Ligação com dente duplo.

A ligação com respiga e mecha é formada por duas componentes: a respiga e a mecha (furo de encaixe) (ver Figura 3). Um dos elementos de madeira possui na extremidade uma respiga prismática que é inserida num orifício, que se encontra no outro elemento, com a forma correspondente (mecha). Este tipo de ligação é usado quando os elementos adjacentes se ligam formando um ângulo entre 45° a 90° .

Neste tipo de ligação, a respiga é acrescentada à superfície do entalhe com o objetivo de garantir uma perfeita conexão entre elementos e prevenir deslocamentos laterais para fora do plano da ligação. Contudo, as forças de compressão continuam a ser transmitidas por contacto na superfície do entalhe.

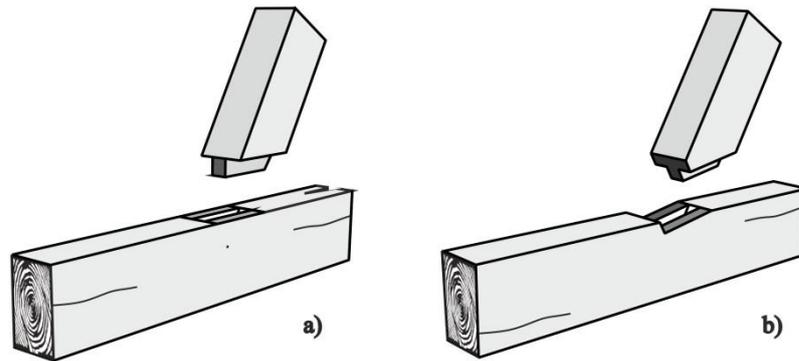


Figura 3 – Ligações tradicionais por entalhes: a) Ligação com respiga e mecha; b) Ligação com dente simples, respiga e mecha.

2.3.2. Cruzamentos

O cruzamento corresponde à união de dois elementos de madeira, normalmente com a mesma espessura. O material é removido de cada um dos elementos e a aglutinação é plana de forma a garantir um encaixe perfeito (Figura 4). Este tipo de ligações são usadas para transmitir esforços de tração ou compressão. Além disso, existe a possibilidade de serem usadas para transmitir esforços transversos em tetos, paredes e coberturas.

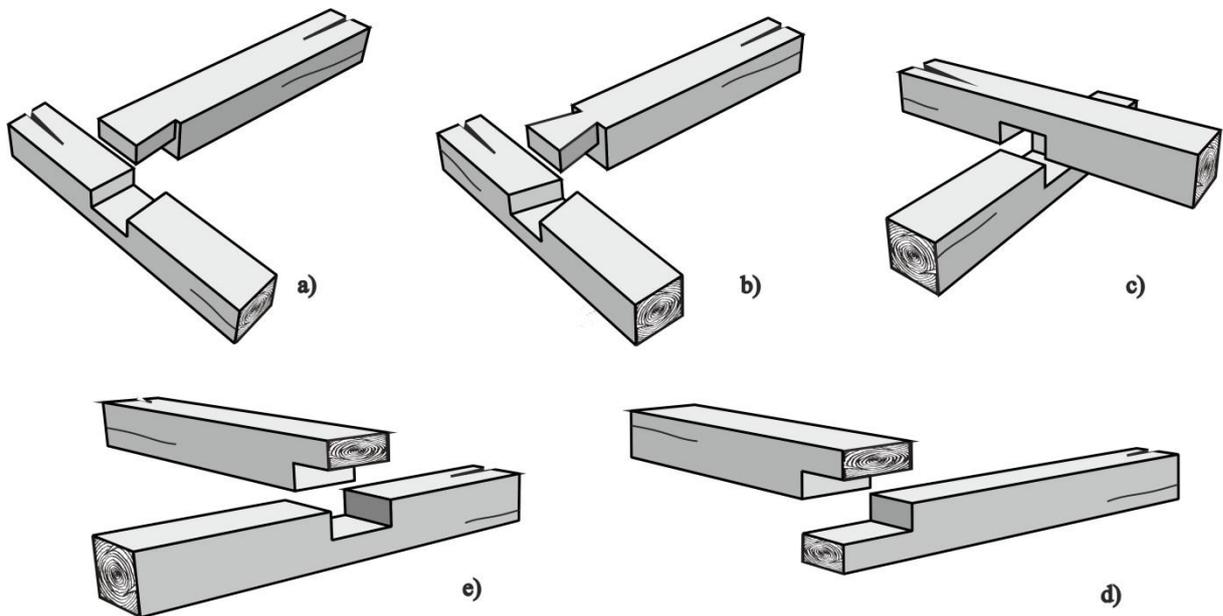


Figura 4 - Cruzamentos: a) Ligação de cauda de andorinha unilateral; b) Ligação de cauda de andorinha; c) Ligação cruz a meio fio; d) Ligação meio fio de encontro; e) Ligação meio fio de ponta.

A ligação em rebaixo é formada por três elementos de madeira: dois laterais e um central (Figura 5). Sendo que o elemento central tem algumas reentrâncias e um calcanhar, que

permitem tensões de tracção através de compressões e tensões tangenciais. Os pinos de madeira ou cavilhas, neste tipo de ligação, impedem que os elementos se desliguem uns dos outros.

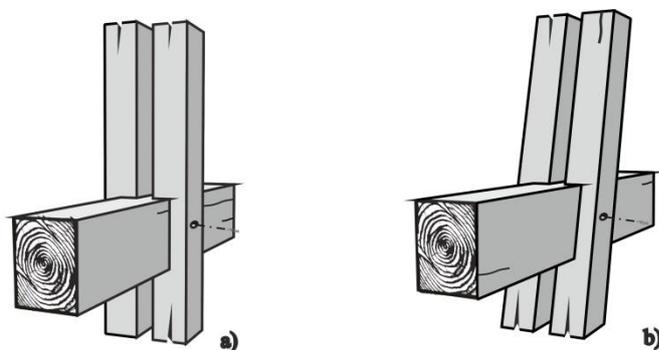


Figura 5 - Ligação em rebaixo: a) reta b) oblíqua.

2.3.3. Empalmes

O empalme corresponde à união das extremidades de dois elementos de madeira, cujo objetivo é aumentar o comprimento do elemento no sentido longitudinal. Assim sendo, este tipo de ligação é usado quando os elementos de madeira não têm o comprimento necessário. Esta técnica permite obter um conjunto com elevado comprimento e boa resistência mecânica. Alguns empalmes possuem um sistema de encaixe que garante uma perfeita união entre os elementos, evitando que estes deslizem. Além disso, também são usados pinos de madeira, ou ligadores metálicos, para ajustar e aumentar o desempenho do conjunto.

Os empalmes variam na forma e inclinação do entalhe. E, em alguns casos, resultaram das tentativas de fortalecer as ligações existentes, isto é, por exemplo, o entalhe com ângulo corresponde a uma forma de melhorar o comportamento da união a meio fio, dado que menos material é removido de cada um dos elementos e o entalhe deixa de formar um ângulo reto (Branco et al., 2015) (ver Figura 7. a) e b)).

2.3.3.1. Empalmes à compressão

O empalme à compressão é uma ligação projetada para transmitir apenas forças de compressão (ver Figura 6). Neste tipo de ligações, a transmissão de esforços é realizada através de tensões de compressão entre as superfícies de contacto e o deslizamento é impedido pelo encaixe entre os elementos e, em alguns casos, devido ao uso de ligadores metálicos ou pinos de madeira.

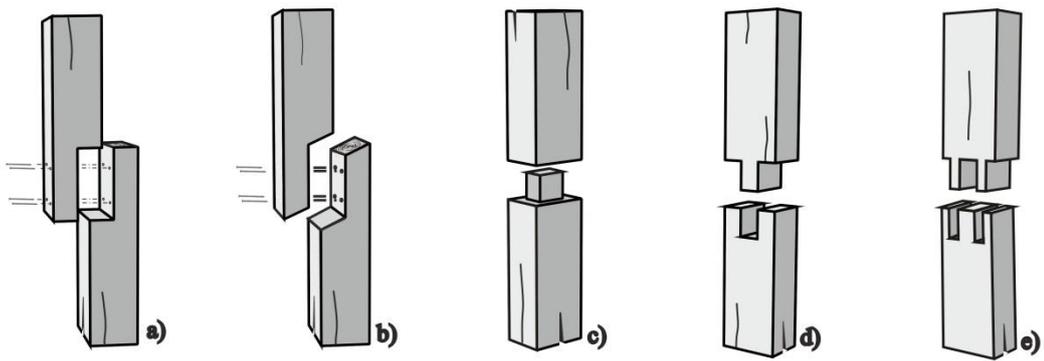


Figura 6 - Empalmes à compressão: a) União a meio fio; b) União a meio fio em viés; c) União com macho; d) União com respiga e mecha; e) União com dupla respiga e mecha.

2.3.3.2. Empalme à tração

Empalme à tração é uma ligação cujo conjunto está submetido a forças de tração. Por vezes, este tipo de ligação requer o uso de pinos de madeira (ver Figura 7.g)) ou acessórios metálicos (ver Figura 7.a); b); c); e); f)), a fim de garantir uma boa rigidez à flexão e evitar a mobilidade transversal dos elementos de madeira.

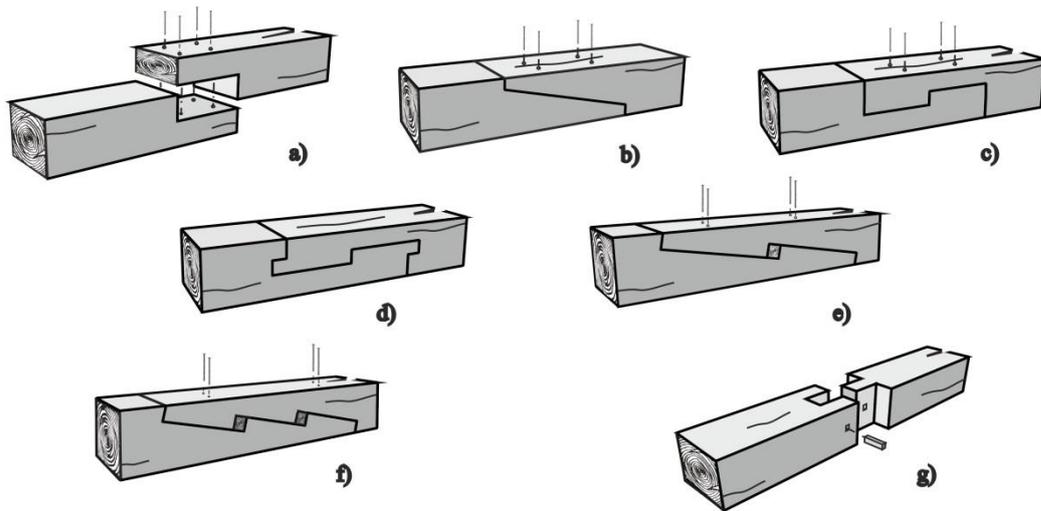


Figura 7 - Empalmes à tração: a) União a meio fio; b) Entalhe com ângulo; c) União a meio fio com entalhe; d) Entalhe a meia madeira com batente; e) Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria (dentada); f) Entalhe com ângulo e dois batentes a meia esquadria (dentada); g) União com respiga e mecha.

2.3.4. Acoplamentos

O acoplamento corresponde à junção lateral ou sobreposição de dois ou mais elementos de madeira, permitindo aumentar a sua secção transversal (Figura 8). As superfícies de contacto de ambos os elementos devem ser exatamente iguais, de modo a garantir uma perfeita união.

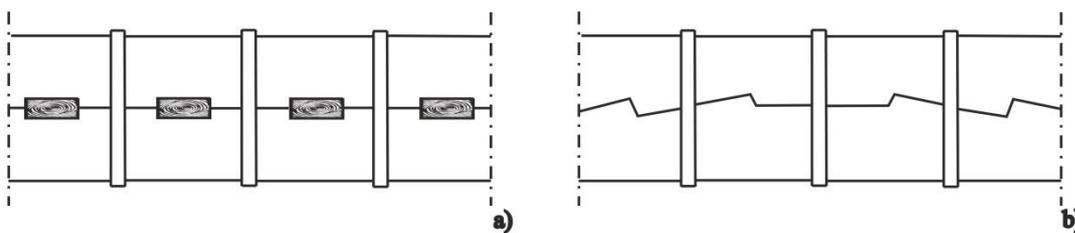


Figura 8 - Acoplamentos: a) Acoplamento com batentes; b) Acoplamento dentado.

2.4. Aplicações estruturais

A construção tradicional em Portugal, com recurso a ligações tradicionais de madeira, é comum nas asnas de madeira e nas paredes de frontal Pombalinas. Atualmente, com a

afirmação do betão armado, as paredes em madeira deixaram de estar em voga. No entanto, as coberturas com asnas de madeira ainda são frequentes.

O mesmo se verifica, de um modo geral, a nível mundial, estendendo-se a sua aplicação também ao nível das pontes e passadiços de madeira.

2.4.1. Asnas de madeira

Em Portugal, tal como em outros países, é comum encontrar-se edifícios históricos cuja cobertura tem como alicerce asnas de madeira.

As asnas, apesar de serem utilizadas desde a antiguidade (homem primitivo), a sua configuração estrutural apenas surge no século IV com base nas técnicas romanas usadas nas igrejas cristãs. Contudo, só a partir do Renascimento Italiano, com a criação da asna de Palladio (asna simples), é que ficou definida a configuração estrutural da asna que melhor se adapta à estrutura da cobertura (Branco, 2008). O facto de a asna ser definida por um sistema estático levou a que, quando comparada com outras asnas tipo, esta apresentasse melhores condições de segurança estrutural.

Ao longo do tempo verificou-se uma evolução, de região para região, na configuração estrutural, nas dimensões (secções transversais mais reduzidas) e no tipo de ligações utilizadas. Esta evolução surge do aprofundar do conhecimento empírico do comportamento estrutural das asnas e da evolução da tecnologia, ao qual está associado o refinamento na concepção das ligações. Contudo, consoante a capacidade de carga e os vão a vencer, existem diferentes tipos de asnas, mais ou menos complexas, que se podem utilizar (Branco, 2008).

De entre os vários tipos de asnas que se encontram em serviço, em Portugal, as mais comuns são: asna simples (ver Figura 9.a)) e asna composta (ver Figura 9.b)) (Branco et al., 2008). Ambas se caracterizam pela sua forma triangular e simétrica, no entanto é a extensão que define o tipo de asna a usar. A asna simples usa-se para vãos até 7-8 metros e é constituída por uma linha, sobre a qual assentam duas pernas inclinadas, que formam a pendente da cobertura (em Portugal, a pendente varia entre 20° e 30° (Branco et al., 2006a)), um elemento vertical- o pendural - e duas escoras, que ligam o pendural e as pernas. Para vãos maiores, cerca de 13-14 metros, utiliza-se a asna composta. Neste tipo de asna, surge a necessidade de incluir escoras, para permitir pernas com maiores comprimentos, e tirantes, para resistirem à componente de tração que surge na ligação escora-linha (Branco et al., 2008).

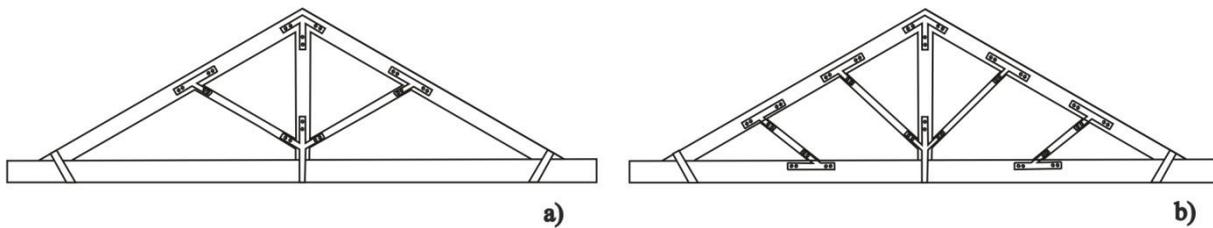


Figura 9 – a) Asna simples reforçada com elementos metálicos; b) Asna composta reforçada com elementos metálicos (adaptado Appleton, 2008).

As ligações executadas para unir os vários elementos que compõem as asnas, foram entre o século XIII e XIX, essencialmente realizadas por meio de entalhes. Contudo, com a descoberta do aço, os elementos metálicos passaram a ser utilizados para melhorar o contacto entre os elementos ligados, corrigir erros de execução e neutralizar inversões de esforços causadas por cargas assimétricas.

A forma como os elementos se ligavam dependia do seu posicionamento. A ligação linha-perna, que corresponde à ligação mais carregadas de uma asna, era constituída por ligações de dente simples, quando a linha possuía talão com comprimento suficiente, ou dente simples anterior, quando a linha e a perna se encontravam. Nas situações em que a ligação linha-perna era mais solicitada era utilizado o dente duplo. Contudo, em alguns casos, em que a perna se estende para além da linha, a linha ligava à perna por meio de cruzamentos (Figura 10) ou entalhes (ver Figura 11), podendo conter respiga e mecha.

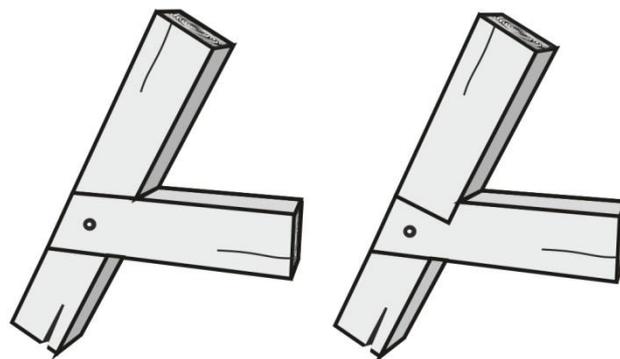


Figura 10 – Ligação linha-perna por meio de cruzamentos.

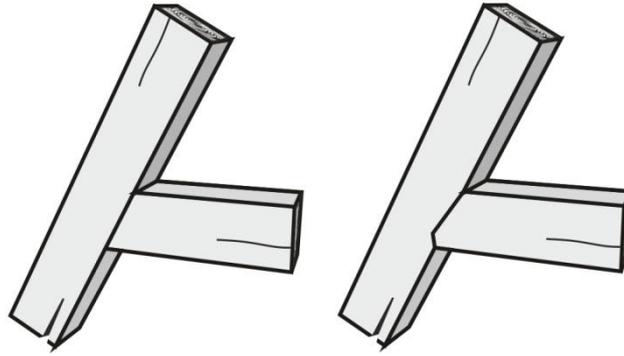


Figura 11 – Ligação linha-perna por meio de entalhes.

Nos telhados de Igrejas Românicas e Góticas, eram usados outros tipos de ligações de respiga e mecha (Igreja em Niedermending e Catedral em Constance) e cauda de andorinha (Igreja em Szydłów do século XIV) (Figura 12).

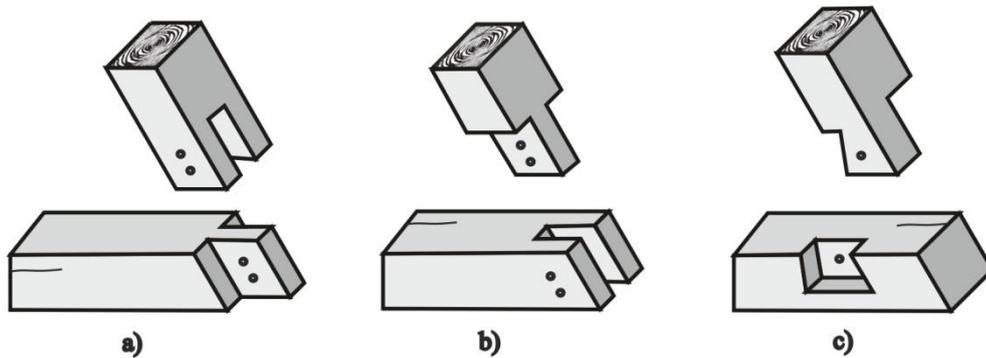


Figura 12 – Ligações tradicionais da ligação linha-perna: a) e b) ligações respiga e mecha; c) ligação cauda de andorinha (adaptado Jasienko et al.,2014).

Nos cumes das asnas, para prevenir o deslocamento dos elementos a ligar e garantir a transferência de esforços axiais, usavam-se ligação com respiga e mecha ou com dente (ver Figura 13), ou cruzamentos (ver Figura 14), nos casos em que os elementos têm dimensões reduzidas.

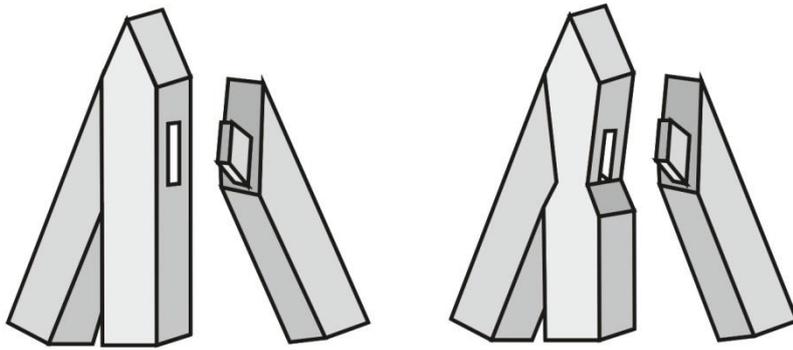


Figura 13 – Ligações dos cumes da asna com recurso a entalhes (adaptado Jasienko et al.,2014).

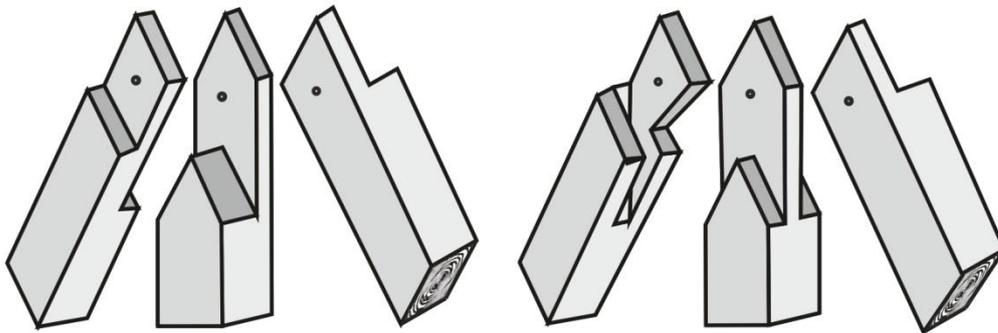


Figura 14 – Ligações dos cumes da asna com recurso a cruzamentos (adaptado Jasienko et al.,2014).

Com a evolução da configuração das asnas, também foram evoluindo a forma como os elementos eram ligados, tornando-se comum o uso de entalhes de dente simples, dente simples posterior ou dente duplo, com ou sem respiga.

Os empalmes de madeira, desde a antiguidade (arquitetura Renascentista Italiana) até aos dias de hoje, são utilizados para garantir a continuidade da linha (ver Figura 15).

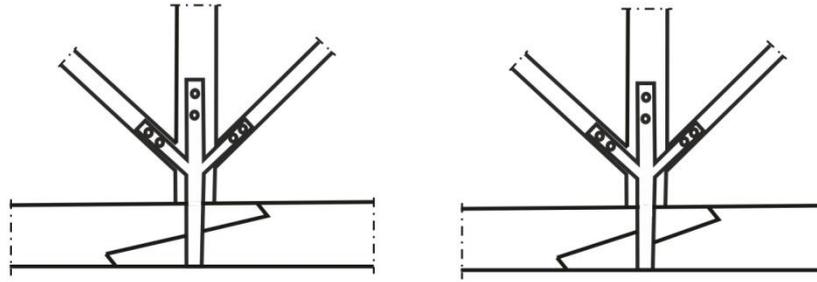


Figura 15 – Empalmes de madeira para garantir a continuidade da linha (adaptado de Branco et al.,2008).

O sistema estrutural sob a qual a asna apoia influencia o projeto total da estrutura (Sobon, 2002). Em edifícios com paredes de alvenaria ou madeira, a linha apoia-se sobre a viga. Contudo, quando a perna se estende para além da linha, a perna liga-se à viga por meio de entalhes, aos quais se adiciona ligadores para fixar a ligação (Figura 16).

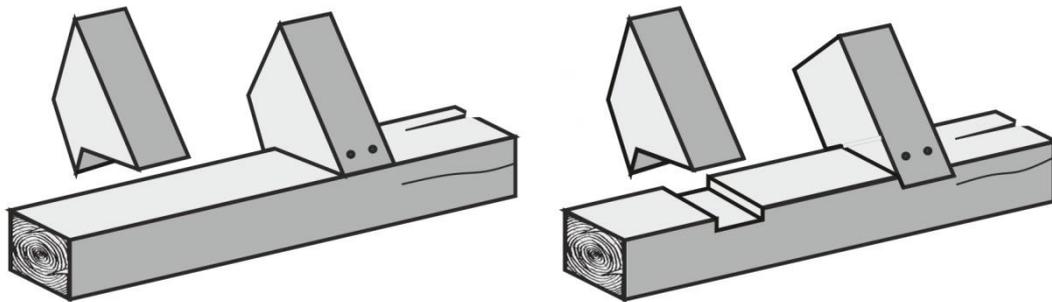


Figura 16 – Ligações de apoio da perna.

As espécies de madeira que comumente são utilizadas nas coberturas em Portugal são o Pinho Bravo (*Pinus pinaster*, Ait.), o Castanho (*Castanea sativa*, Miller), o Carvalho (*Quercus robur*, L.) e o Eucalipto (*Eucalyptus globulus*, Labill) (Branco, 2012). O castanho, por ser mais durável, está essencialmente presente nas construções nobres antigas, nomeadamente igrejas e mosteiros. Por sua vez, o eucalipto e o Pinho bravo, por razões de disponibilidade e económicas, é comum na construção corrente a partir de meadas do século XIX.

2.4.2. Paredes de madeira

A aplicação de madeira em paredes é sobretudo relevantes em paredes de frontal pombalina. Na construção tradicional, as paredes de frontal pombalina tem sido usada desde os tempos mais antigos (desde o Império Romano, em Itália) e representa o património cultural de muitos países, não só onde existe actividade sísmica (Portugal, Itália, Grécia), mas também em países com abundância de madeira (Alemanha, Inglaterra, Escandinávia) (Poletti, 2013) (Figura 17). Podendo ainda ser encontrados em alvenaria armada na Áustria, Hungria, Polónia, Albânia, Roménia, Suíça, Jugoslávia e Macedónia (Poletti, 2013).

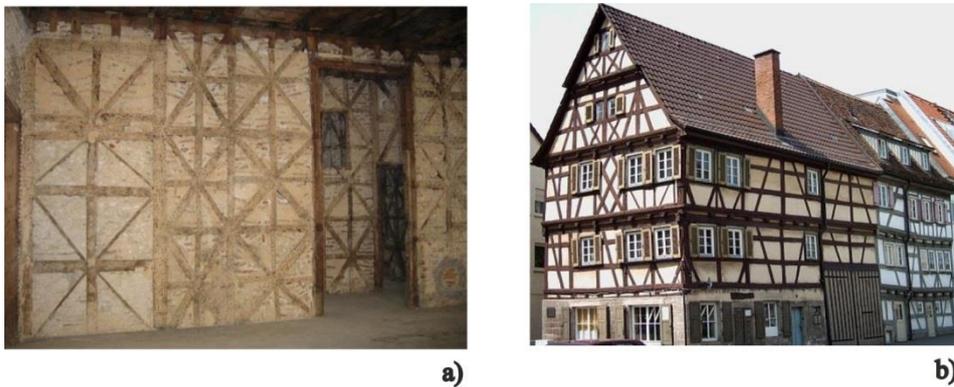


Figura 17 – Exemplos de construção de paredes em madeira: a) paredes de frontal pombalina construída em Lisboa (Poletti, 2013); b) Construção típica enxaimel em Sindelfinge, Baden-Württemberg, Alemanha (Poletti, 2013).

Em Portugal, a construção pombalina surgiu como uma forma de acelerar o processo de reconstrução da cidade de Lisboa, na sequência do terramoto de 1755, e garantir a resistência sísmica dos edifícios.

As paredes de frontal pombalina são constituídas por um reticulado de elementos de madeira (prumos, travessas e diagonais), com um enchimento de pedras ou fragmentos de alvenaria, ligados por argamassa de cal. O reticulado em madeira, principal elemento de suporte de carga da parede, apresenta um bom comportamento aos esforços de tração e compressão, além de apresentar uma boa capacidade de dissipação de energia. Por sua vez, os restantes componentes permitem o confinamento da estrutura.

Os elementos de madeira são ligados através de entalhes (ver Figura 18) ou por pregos ou elementos metálicos. De acordo com Poletti (2013), as ligações tradicionais usadas para ligar

os elementos que constituem a parede variam significativamente, sendo as mais comuns a ligação com respiga e mecha, a ligação cruz a meio fio e a ligação de cauda de andorinha.

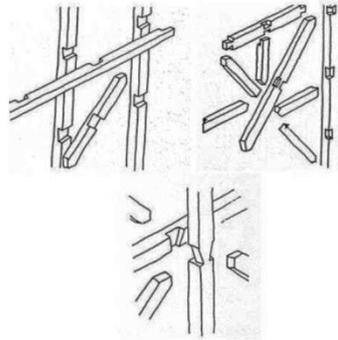


Figura 18 – Exemplos das ligações usadas nas paredes de frontal pombalina (Mascarenhas, 2004).

A madeira comumente utilizada na construção das paredes de frontal pombalina é: o Pinho, o Carvalho, o Castanho, o Sobre e o Azinho (Machado et al., 2009).

Em edifícios históricos da Polónia (século XV e XVI), nomeadamente nas áreas rurais e nas pequenas cidades, é comum a construção de paredes de madeira (Jasienko et al., 2014). Estas paredes eram constituídas por elementos de madeira sobrepostos com ligações nos cantos esquerdos. As ligações que eram usadas na execução destas paredes eram ligações de cruzamento (Figura 19. a)). Também era comum a existência de ligações com saliências o que tornava os cantos estaticamente fortes (Figura 19. b)).

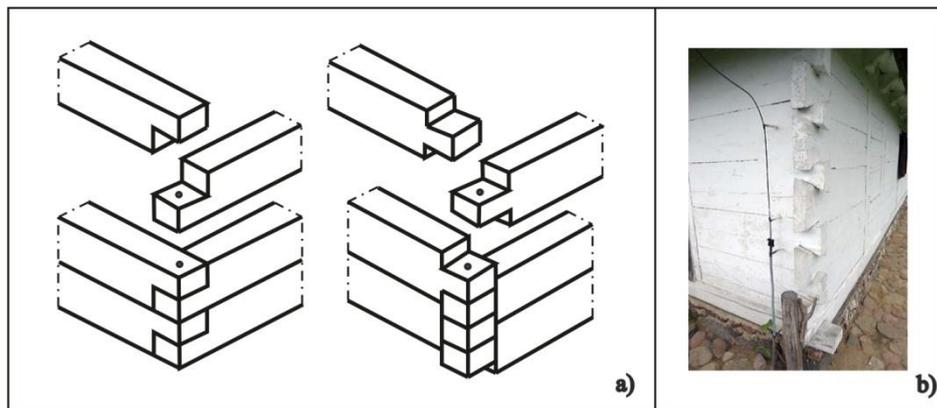


Figura 19 – Exemplos de ligações na construção de paredes em edifícios históricos na Polónia: a) cruzamentos; b) ligação com saliência cauda de andorinha (Jasienko et al., 2014).

2.4.3. Pontes de madeira

O uso da madeira na construção de pontes vem desde os tempos mais antigos (período neolítico). Contudo, a primeira aproximação à configuração estrutural de uma ponte surge no Império Romano e a sua estrutura consistia numa série de vigas (transversais e longitudinais) e estacas inclinadas, que se ligavam por meio de entalhes de modo a garantir a sua rápida montagem e desmontagem (Figura 20) (Ritter, 1990).

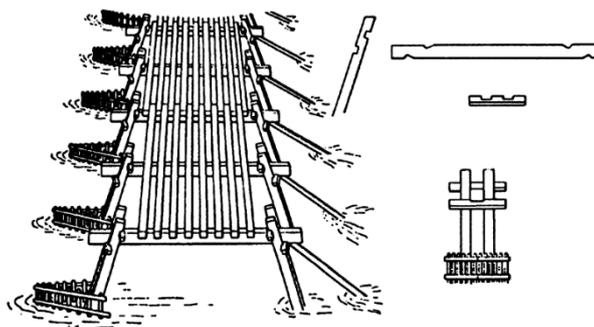


Figura 20 – Ponte de Cesar de acordo com Palladio (Ritter, 1990).

Durante a Idade média até ao século XVIII, o qual coincidiu com um período focado no desenvolvimento de obras públicas, a evolução do conhecimento influenciou a concepção e a construção de pontes em madeira e levou aos primeiros arcos, treliças e pontes com cobertura em madeira (Ponte Schaffhausen (1758), Rio Reno).

O século XIX esteve associado à crescente necessidade de obras públicas e sistemas de transporte, resultantes da revolução industrial, o que levou à sofisticação no uso da madeira em pontes, verificando-se uma larga aplicação dos arcos e treliças nas pontes e vãos com maiores dimensões.

No início do século XX, com o desenvolvimento da indústria do aço e a popularidade do betão armado, a madeira deixa de ser o material fundamental na construção de pontes. No entanto, os avanços tecnológicos, os tratamentos preservativos e a origem da madeira de lamelado colado, permitiram colmatar algumas das limitações ao uso da madeira no que se refere às dimensões dos elementos e à sua deterioração quando exposta a agentes biológicos, e atraíram o uso da madeira novamente nas pontes, nomeadamente nos Estados Unidos, no Canadá, na Inglaterra, no Japão e na Austrália.

Existem diversos tipos e configurações de pontes em madeira, no qual umas resultaram da evolução de projetos anteriormente desenvolvidos, enquanto outras resultaram da inovação estrutural e dos avanços tecnológicos do projeto e fabricação da madeira (Ritter, 1990). A

grande inovação estrutural, baseada na teoria do equilíbrio dos nós, foi o uso de vigas em treliça na execução das pontes. A treliça era constituída por elementos que formam entre si uma malha triangular e unem-se entre si por meio de ligações, transmitindo esforços de tração e compressão entre si.

As ligações representam os elementos que relevam maior fragilidade, ao mesmo tempo que garantem a continuidade da estrutura. Nas pontes, para unir os elementos entre si, normalmente são utilizadas ligações tradicionais (entalhes, cruzamentos e empalmes), ao qual podem estar associados pinos de madeira ou ligadores metálicos (Figura 21). Com a revolução industrial, surgiu uma grande variedade de elementos de fixação, garantindo a facilidade da ligação entre os elementos.

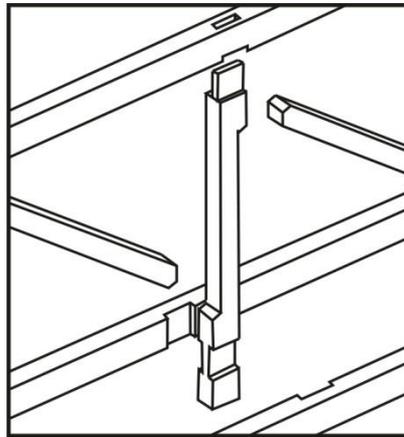


Figura 21 – Exemplo de ligações tradicionais usadas na construção de uma ponte (Pierce et al., 2005).

Capítulo 3

DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA

3.1. Ligações tradicionais por entalhes

As ligações por entalhes incluem o dente simples, podendo possuir respiga e mecha, o dente simples posterior e o dente duplo (Figura 22). A ligação por dente simples é a mais comum, sendo o dente simples posterior utilizado quando, por qualquer razão, o comprimento do talão é limitado. O dente duplo combina os dois tipos de dente simples e permite aumentar a superfície de contacto no entalhe.

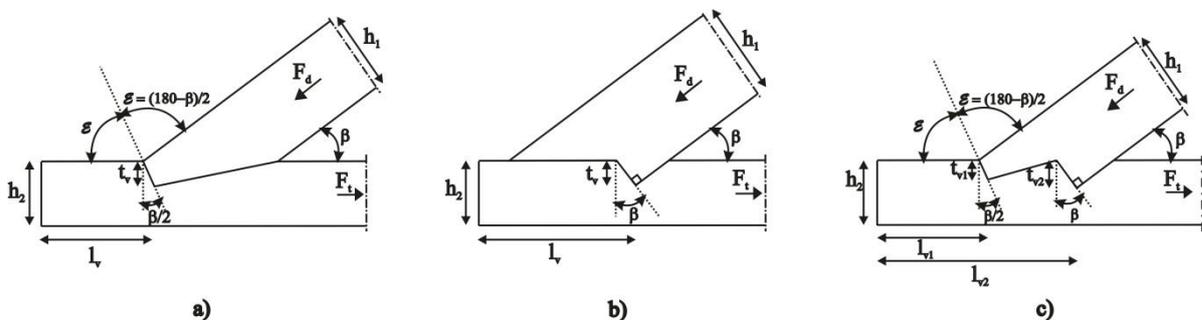


Figura 22 - Ligações por entalhe: a) dente simples; b) dente simples posterior; c) dente duplo.

Ao nível do entalhe, as forças são transmitidas através de tensões de compressão por contacto direto entre as superfícies e atrito. Assim sendo, este tipo de ligações estão limitadas à transmissão de esforços de compressão na superfície de contacto e esforços de corte ao longo do talão (comprimento da linha na frente do entalhe).

O valor da força transferida (F_d) nas superfícies da ligação depende da área do entalhe no qual é transferida a carga (tensão de compressão) e da resistência à compressão num determinado ângulo (α) formado com a direção das fibras da madeira.

Na antiguidade, na maioria das vezes, as ligações eram concebidas tendo em conta a prática tradicional, com base em conhecimentos empíricos ou em regras muito simplificadas, sem qualquer suporte experimental ou analítico (Parisi et al., 2008). Atualmente, muitas dessas ligações antigas não cumprem os requisitos de segurança, em especial para a ação sísmica. Daí surge a necessidade de recolher e sintetizar as regras de conceção das ligações entalhadas e avaliar a segurança da ligação, verificando a capacidade resistente da ligação ao esmagamento nas superfícies do entalhe e as tensões de corte no talão. Contudo, existem outros modos de rotura, que dependem da geometria da ligação e do seu posicionamento na estrutura, nomeadamente: tracção na secção reduzida na secção transversal ao entalhe; as tensões combinadas devido à flexão induzida na secção transversal do entalhe por carga excêntrica; flexão composta com tracção na secção transversal ao entalhe; entre outros (Pierce et al., 2005; Dias et al., 2009).

3.1.1. Dente simples e dente duplo

3.1.1.1. Disposição geométrica

3.1.1.1.1. Inclinação do entalhe

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

Na ligação com dente simples, o ângulo do entalhe ε é definido a partir de β (ângulo de abertura entre os elementos ligados), e toma o valor de $(90^\circ - \beta/2)$ quando a perna e a linha são constituídos pelo mesmo material, o que garante que o ângulo entre as fibras e as tensões de compressão são iguais em ambos os elementos ($\alpha_L = \alpha_P = \beta/2$) (ver Figura 23.a)). Caso sejam constituídos por diferentes materiais, a solução ideal será adoptar ângulos diferentes ($\alpha_L \neq \alpha_P$) de forma a otimizar a transmissão das tensões de compressão (Figura 23.b)).

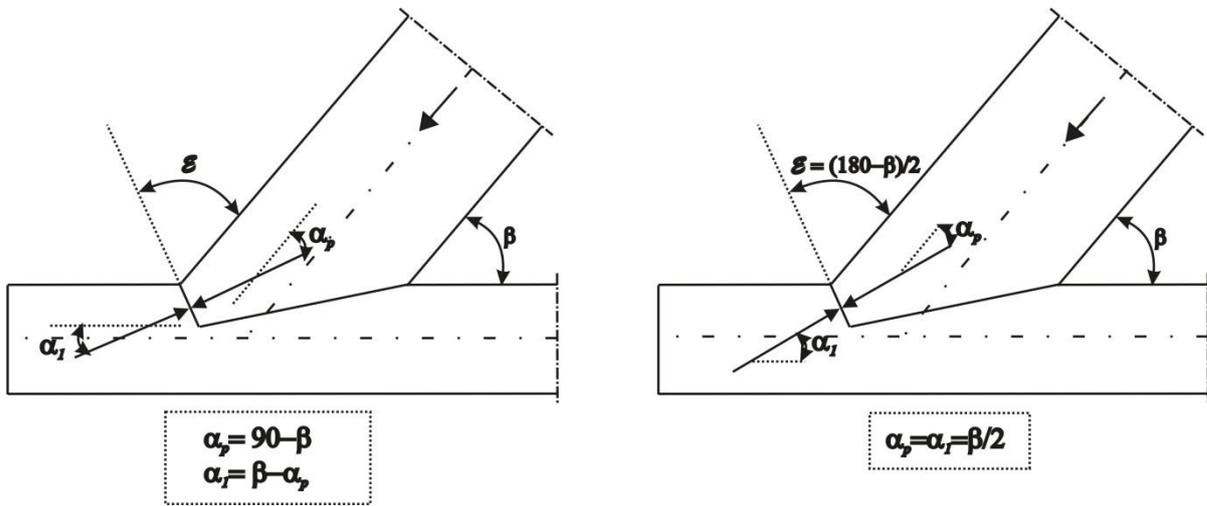


Figura 23 - Ângulo definido entre as fibras e a força de compressão axial.

Atendendo às informações disponíveis, verifica-se que existem diferentes regras para definir o ângulo ε . O valor de ε definido pelas normas holandesas NEN 3852 (1973) e NEN 6760 (2005) é dado por:

$$90^\circ - \frac{1}{2}\beta \leq \varepsilon \leq 90^\circ \quad (1)$$

Por sua vez, a norma Suíça SIA 265 (2012) e Espanhola DB-SE-M (2009) admite que $\varepsilon = 90^\circ - \frac{1}{2}\beta$.

No caso da ligação com dente simples posterior, o ângulo do entalhe ε é geralmente $(90^\circ - \beta)$, o que significa que o entalhe é perpendicular ao eixo da perna (ver Figura 24). Deste modo, verifica-se uma perda de resistência e rigidez da linha em relação à perna, dado que o ângulo entre as fibras e a força de compressão axial é maior na linha. Contudo, a norma holandesa NEN 6760 (2005) considera a seguinte restrição: $90^\circ \leq \varepsilon \leq 110^\circ$.

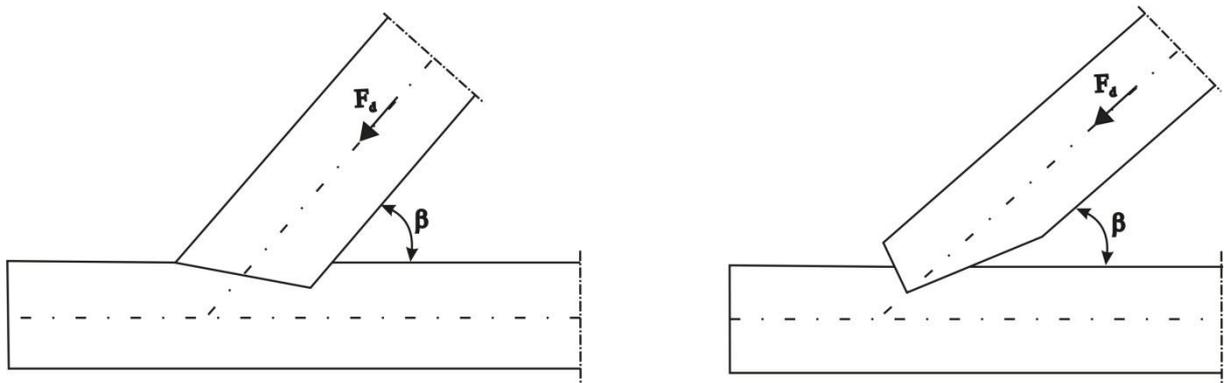


Figura 26 – Exemplos de ligações de dente simples posterior.

A ligação com dente duplo, cuja geometria resulta da sobreposição de dois elementos constituídos, cada um deles por um dente simples, só se deverá usar se:

$$\begin{aligned} \beta &\leq 50^\circ \text{ segundo as normas holandesas NEN 3852 (1973) e NEN 6760 (2005)} \\ \beta &\leq 40^\circ \text{ segundo a norma suíça SIA 265 (2012)} \end{aligned} \quad (2)$$

3.1.1.1.2. Profundidade do entalhe

A fim de evitar o enfraquecimento da capacidade resistente do elemento, é necessário estabelecer um limite para a profundidade do entalhe t_v . Quer para o dente simples anterior ou dente simples posterior, a profundidade do entalhe é dado em função do ângulo β e definida por (Tabela 1):

Tabela 1 - Definição da profundidade do entalhe de acordo com as diferentes normas: Suíça (SIA 265, 2012), Alemã (DIN 1052, 2005), Espanhola (DB-SE-M, 2009), Italiana (CNR-DT 206, 2007) e Holandesa (NEN 3852, 1973; NEN 6760, 2005).

| SIA 265 (2012); DIN 1052 (2005); DB-SE-M (2009) e CNR-DT 206 (2007) | NEN 3852 (1973) e NEN 6760 (2005) |
|--|--|
| $t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{6}$ para $\beta > 60^\circ$ $t_v \leq \frac{h_2}{120} (80 - \beta)$ para $50^\circ < \beta \leq 60^\circ$ | $t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{5}$ para $\beta > 50^\circ$ |
| <p>Legenda: t_v é a profundidade do entalhe, h_2 é a altura da linha e β é o ângulo formado entre as linhas centrais dos elementos que constituem a ligação.</p> | |

No caso da ligação com dente duplo, independentemente do ângulo β , as profundidades dos entalhes t_{v1} e t_{v2} (SIA 265, 2012; DB-SE-M, 2009; CNR-DT 206, 2007) são definidas por:

$$t_{v1} \leq \frac{h_2}{6} \quad (3)$$

$$t_{v2} \leq \frac{h_2}{4} \quad (4)$$

Assim sendo, o entalhe posterior deve ser mais profundo que o entalhe anterior, de modo a garantir que não se cria uma superfície de corte entre os dois entalhes ($l_{v2} - l_{v1}$) (ver Tabela 2). A execução deste tipo de ligação requer uma elevada precisão, de modo a garantir que todas as superfícies estejam em contacto.

Tabela 2 - Definição da profundidade do entalhe t_{v1} .

| SIA 265 (2012) e DB-SE-M (2009) | CNR-DT 206 (2007) |
|------------------------------------|---|
| $t_{v1} \leq t_{v2} - 10\text{mm}$ | $t_{v1} \leq \begin{cases} t_{v2} - 10\text{mm} \\ 0.8t_{v2} \end{cases}$ |

3.1.1.1.3. Comprimento do talão

O talão corresponde ao troço da linha entre o topo da peça e o entalhe (Figura 27), e nele se desenvolve tensões de corte paralela às fibras. No caso de ligação com dente simples, o valor mínimo do comprimento do talão l_v é 150 mm (DB-SE-M, 2009; SIA 265, 2012) ou 200 mm (DIN 1052, 2005) e destina-se a aumentar a resistência ao corte da ligação através do aumento da superfície de corte paralelo às fibras na frente do entalhe. Contudo, podem ser necessários comprimentos superiores para acomodar uma distribuição uniforme e as tensões de corte paralelas às fibras, responsáveis pela rotura frágil da madeira, e não deve exceder o comprimento de $8t_v$ (DIN 1052, 2005; Martitegui et al., 2013a).

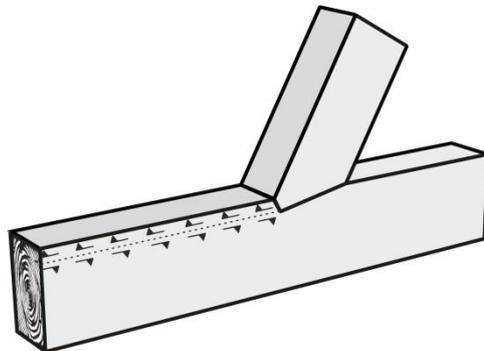


Figura 27 - Superfície de corte no talão.

A ligação com dente simples posterior tem uma superfície de corte paralelo às fibras maior que a ligação com dente simples, o que significa que têm um maior comprimento para resistir às tensões de corte, sem que para isso seja necessário aumentar o comprimento do elemento de madeira.

No caso de ligação com dente duplo, a área mobilizada para as tensões de corte paralelas às fibras é maior (l_{v1} e l_{v2}) (ver Figura 22.c)). Além disso, possui maior capacidade de carga, dado que este tipo de entalhe é constituído por dois dentes, suficientemente afastados, que aumentam a superfície de contacto e reduzem as tensões de compressão em cada entalhe.

Relativamente ao comprimento do talão, existem diferentes restrições tal como mostra a Tabela 3:

Tabela 3 - Regras geométricas do comprimento do talão para dente duplo.

| NEN 3852 (1973) e NEN 6760 (2005) | SIA 265 (2012) e DB-SE-M (2009) | Colling (2004) |
|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| $l_{v1} \geq 6 \cdot t_{v1}$ | $l_{v1} \geq 150\text{mm}$ | $l_{v1} \leq 8 \cdot t_{v1}$ $200 \text{ mm} \leq l_{v2} \leq 8 \cdot t_{v2}$ |

3.1.1.1.4. Dimensões e forma da respiga

A respiga, encaixe de forma prismática (Figura 28), geralmente possui uma largura b_p igual a cerca de 1/3 da espessura do elemento de madeira (Feio, 2006). Para garantir o bom funcionamento do encaixe, a mecha deve ter uma largura igual à da respiga.

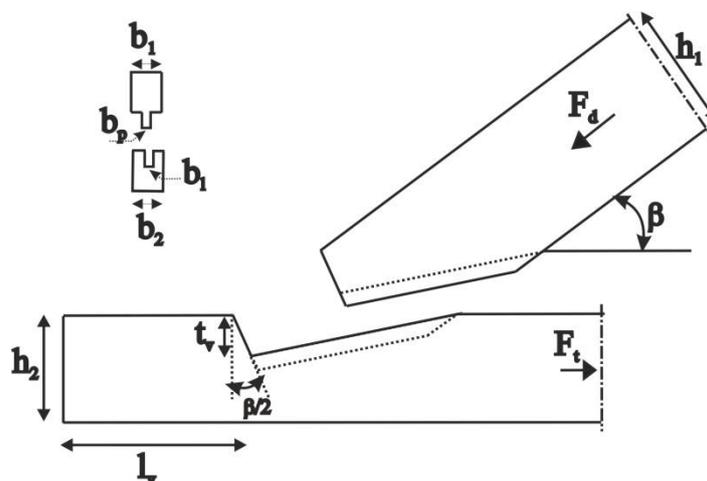


Figura 28 - Dente simples anterior com respiga e mecha.

3.1.1.2. Verificação da segurança

Os elementos de madeira quando carregados por uma força F_d originam tensões que podem ocorrer na direção das fibras, na direção perpendicular às fibras, com um ângulo α em relação à direção das fibras e também tensões de corte. Assim sendo, na verificação da segurança das ligações por entalhe é necessário definir os caminhos de transmissão de tensões e verificar a resistência do entalhe às forças de compressão e às tensões de corte sobre o talão.

No Eurocódigo 5 (EN 1995-1:2010) não são abordadas regras para a verificação da segurança das ligações tradicionais, o que leva a que existam diferenças entre os métodos de cálculo apresentados pelos diferentes autores e normas nacionais. Os critérios de verificação de segurança diferem sobretudo na decomposição das forças sobre as superfícies de contacto e ainda no facto de algumas considerarem a existência de forças de atrito e outras não. Contudo, a contribuição do atrito para a resistência da ligação assume uma importância significativa sendo influenciada pelo contacto das superfícies dos elementos de madeira e pela rugosidade. Estes dois fatores variam ao longo da vida da ligação, pelo que a não inclusão do atrito na capacidade resistente da ligação representa uma opção conservativa.

3.1.1.2.1. Anexo Nacional Holandês do Eurocódigo 5 (NEN-EN 1995-1-1, 2013)

O Anexo Nacional Holandês do Eurocódigo 5 recorre a uma abordagem simples e direta, isto é, assume que a força de compressão é igualmente distribuída entre a projeção horizontal e vertical das superfícies de contacto (ver Figura 29). Assim sendo, as tensões de compressão são igualmente distribuídas ao longo das áreas ($b \times t_v$) e ($b \times e$) e atuam sobre a profundidade e o comprimento do entalhe.

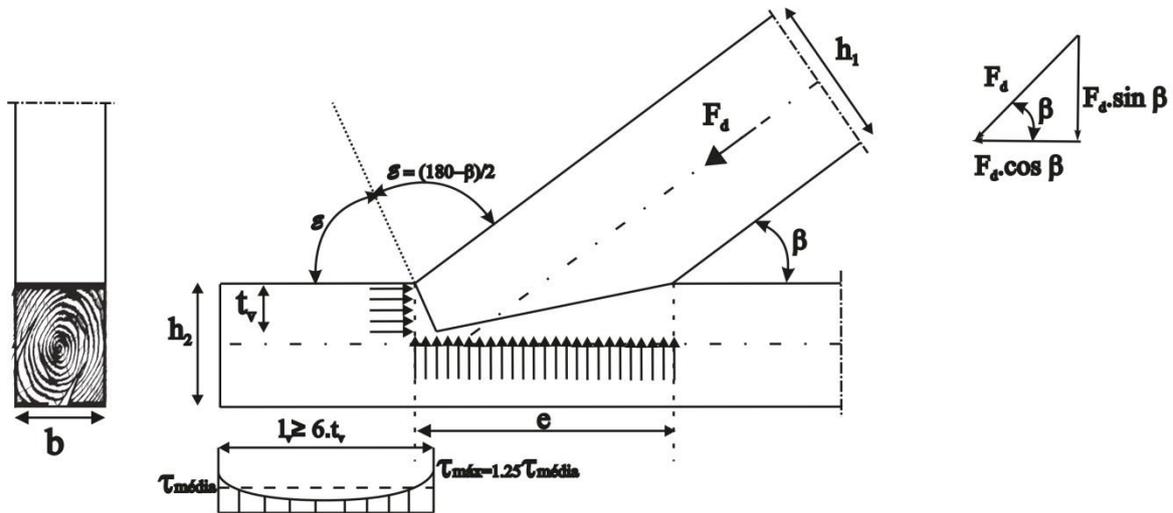


Figura 29 - Esquema de distribuição das forças, segundo Anexo Nacional Holandês do EC5.

As equações que se seguem (Tabela 4) não têm em conta a redução da resistência de compressão na superfície de contacto, entre os elementos que constituem a ligação, provocado pelo ângulo entre a força e a direcção da fibra. Contudo, assume uma redução de 20 % no valor de cálculo da tensão tangencial resistente, dado que a distribuição da tensão ao longo do talão não é uniforme.

Tabela 4 - Equações de dimensionamento do dente simples e duplo, segundo Anexo Nacional Holandês do EC5 (NEN-EN 1995-1-1, 2013).

| | Dente simples | Dente duplo |
|---|--|---|
| Verificação à compressão do dente (entalhe): | $\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot t_v} \leq f_{c,0,d}$ | $\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot t_{v2}} \leq f_{c,0,d}$ |
| Verificação à compressão da superfície da linha: | $\frac{F_d \cdot \sin \beta}{b \cdot e} \leq f_{c,90,d}$ | $\frac{F_d \cdot \sin \beta}{b \cdot e} \leq f_{c,90,d}$ |
| Verificação ao corte do talão: | $\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_v} \leq 0.8f_{v,d}$ | $\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_{v2}} \leq 0.8f_{v,d}$ |

Onde F_d é a força axial, β é o ângulo formado entre os elementos que constituem a ligação, b é a largura do elemento de madeira, t_{v2} é a profundidade do entalhe posterior, e é a distância da superfície de corte, l_{v2} é o comprimento da superfície de corte do entalhe posterior, $f_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão na direção paralela à direção das fibras, $f_{c,90,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão na direção perpendicular à direção das fibras e $f_{v,d}$ é o valor de cálculo da tensão tangencial resistente.

O valor $f_{c,\alpha,d}$ é dado pela fórmula da Teoria de Hankinson presente no EC5: 6.2.2 (2):

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{K_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \quad (5)$$

Onde $f_{c,\alpha,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão a um ângulo α em relação às fibras e $K_{c,90}$ é o fator que têm em conta a distribuição da carga, a possibilidade de divisão da carga e grau de deformação à compressão. $K_{c,90}$ toma o valor 1, excepto nos casos definidos no EC5: 6.1.5 (2); (3); (4) e α é o ângulo formado entre a direção da força aplicada e a direção das fibras.

3.1.1.2.2. Norma Suíça SIA 265 (2012) e Espanhola DB-SE-M (2009)

A norma Suíça e Espanhola consideram que a força de compressão se decompõe em duas componentes: vertical e horizontal (Figura 30).

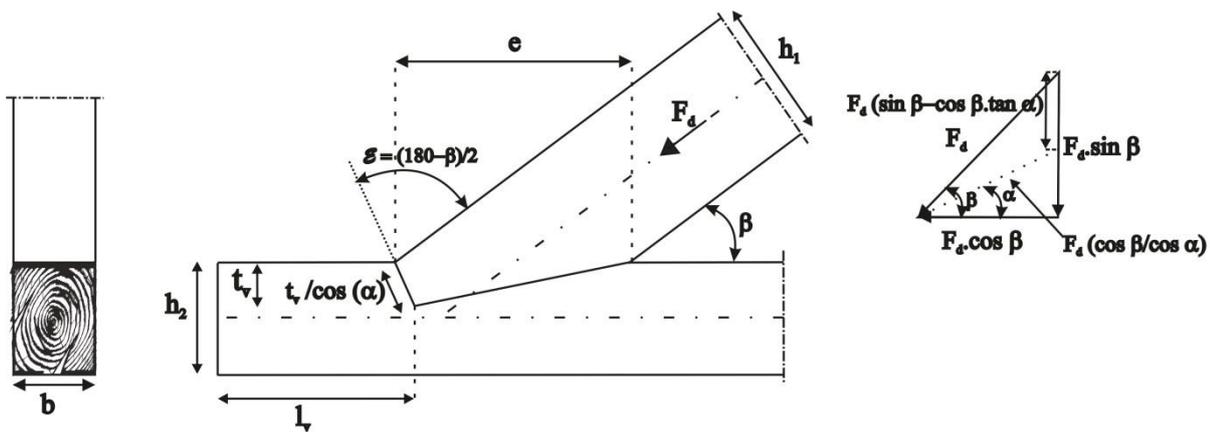


Figura 30 - Esquema de distribuição das forças, segundo a norma Suíça e Espanhola.

A componente horizontal da força é projetada perpendicularmente em relação à superfície frontal do entalhe. E nessa área ocorrem concentração de tensões de compressão que podem levar ao esmagamento da superfície frontal do entalhe. Assim sendo, e admitindo uma distribuição uniforme de tensões, obtêm-se uma tensão atuante, dada por:

$$\frac{F_d \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}}{b \cdot \frac{t_v}{\cos \alpha}} \leq f_{c,\alpha,d} \quad (6)$$

Nas ligações com dente simples, é recomendado que o ângulo α tome o valor de $\frac{\beta}{2}$.

Segundo as DB-SE-M (2009) e SIA 265 (2012), o valor da resistência à compressão paralela às fibras deve ser reduzido em 20% devido à possibilidade de esmagamento das fibras em

consequência da diferença entre a força dos anéis claros (madeira de Primavera) e anéis escuros (madeira de Verão/Outono). E resulta numa versão modificada da fórmula da Teoria de Hankinson (Equação 5), isto é:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{0.8f_{c,0,d}}{\frac{0.8f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \quad (7)$$

Em ligações com dente duplo, são tidas em conta as seguintes considerações na verificação ao esmagamento da superfície frontal do entalhe: a profundidade do entalhe é $t_v = t_{v1} + t_{v2}$; e o ângulo α corresponde ao ângulo intermédio entre os dois entalhes e toma o valor de $\alpha=3/4\beta$.

Por sua vez, a componente vertical atua perpendicularmente em relação à fibra sobre a área ($b_2 \times e$) e o valor da tensão atuante é dado por:

$$\frac{F_d \cdot \sin \beta}{b \cdot e} \leq f_{c,\beta,d} \quad (8)$$

Onde e é a distância da superfície de corte.

Sob o talão geram-se tensões de corte, paralelas às fibras, em resultado da componente horizontal da força que atua na superfície frontal do entalhe.

$$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_v} \leq k \cdot f_{v,d} \quad (9)$$

Onde, k é o coeficiente de redução do valor de $f_{v,d}$ e é dado por:

$$k = \begin{cases} 0.8 & \text{para madeira lamelada colada} \\ 0.6 & \text{para madeira maciça} \end{cases}$$

3.1.1.2.3. Norma Alemã DIN 1052 (2005)

A norma Alemã considera que a força de compressão que atua sobre a ligação se decompõe em duas componentes perpendiculares às faces do entalhe (F_1 e F_2) (ver Figura 31).

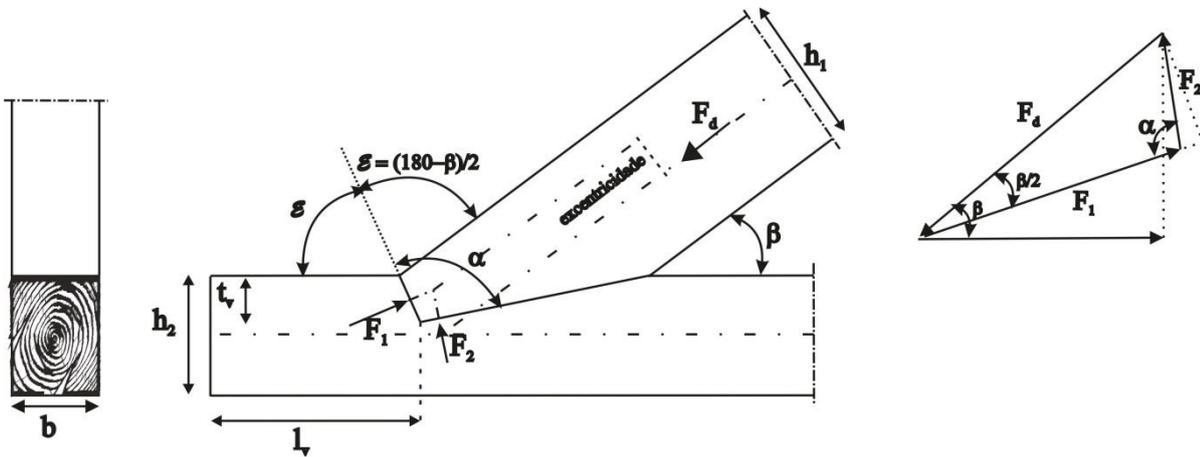


Figura 31 - Esquema de distribuição das forças, segundo a norma alemã DIN 1052 (2005).

A força F_1 corresponde à componente que atua na superfície frontal do entalhe, tendo em conta que o ângulo de base do suporte (α) é maior ou igual a 90° .

$$F_1 = F_d \cdot \cos \frac{\beta}{2} \quad (10)$$

Assim sendo, a concentração de tensões de compressão provoca o esmagamento da superfície frontal do entalhe que atua com um determinado ângulo em relação às fibras dos elementos que compõem a ligação.

A força F_1 , que atua perpendicularmente em relação à superfície do entalhe, provoca uma tensão de compressão que é dada por:

$$\frac{F_d \cdot \cos \frac{\beta}{2}}{b \cdot \frac{t_v}{\cos \frac{\beta}{2}}} \leq f_{c, \frac{\beta}{2}, d} \quad (11)$$

Para determinar o valor da resistência à compressão a um ângulo $\alpha = \beta/2$ em relação às fibras, a norma Alemã usa uma derivação da Teoria de Norris.

$$f_{c, \alpha, d} = \frac{f_{c, 0, d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c, 0, d}}{2 \cdot f_{v, d}}\right)^2 \cdot \sin^2(\alpha) \cdot \cos^2(\alpha) + \left(\frac{f_{c, 0, d}}{2 \cdot f_{c, 90, d}}\right)^2 \cdot \sin^4(\alpha) + \cos^4(\alpha)}} \quad (12)$$

A força F_2 que atua na superfície mais longa do entalhe pode ser negligenciada, dado que a força de compressão nessa superfície não é significativa.

A tensão de corte assume-se como sendo uniformemente distribuída até um comprimento máximo de talão igual a $8 \cdot t_v$ e é dada por:

$$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_v} \leq f_{v,d} \quad (13)$$

3.1.1.2.4. Thierry Descamps

Nas equações apresentadas por Thierry Descamps¹ não se consideram as forças de atrito nem as imperfeições geométricas (Figura 32) (Branco et al., 2015). Contudo, as forças de atrito assumem sempre alguma importância e em alguns casos pode diminuir as tensões sobre o talão.

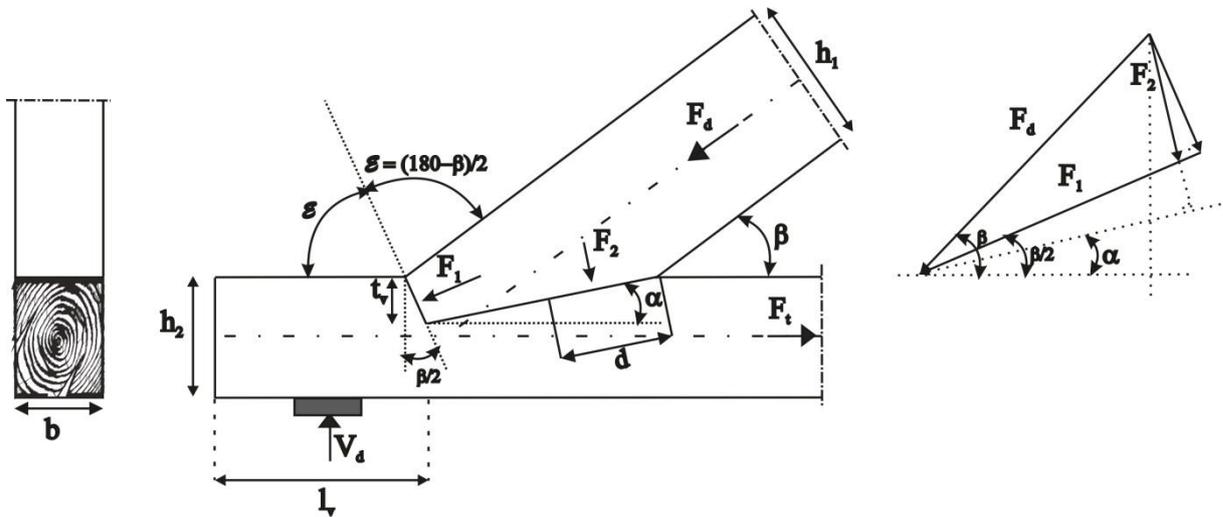


Figura 32 - Esquema de distribuição das forças (adaptado de Descamps¹).

A força axial divide-se em duas componentes (ver Figura 33. a)), F_1 e F_2 , perpendiculares às duas superfícies de entalhe e são dadas por:

$$F_1 = F_d \cdot \cos \frac{\beta}{2} - F_d \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot \tan \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right) < F_d \cdot \cos \frac{\beta}{2} \quad (14)$$

$$F_2 = \frac{F_d \cdot \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right)} \quad (15)$$

¹ http://www.costfp1101.eu/images/TS%20mons/Carpentry%20Joints_Thierry%20Descamps.pdf

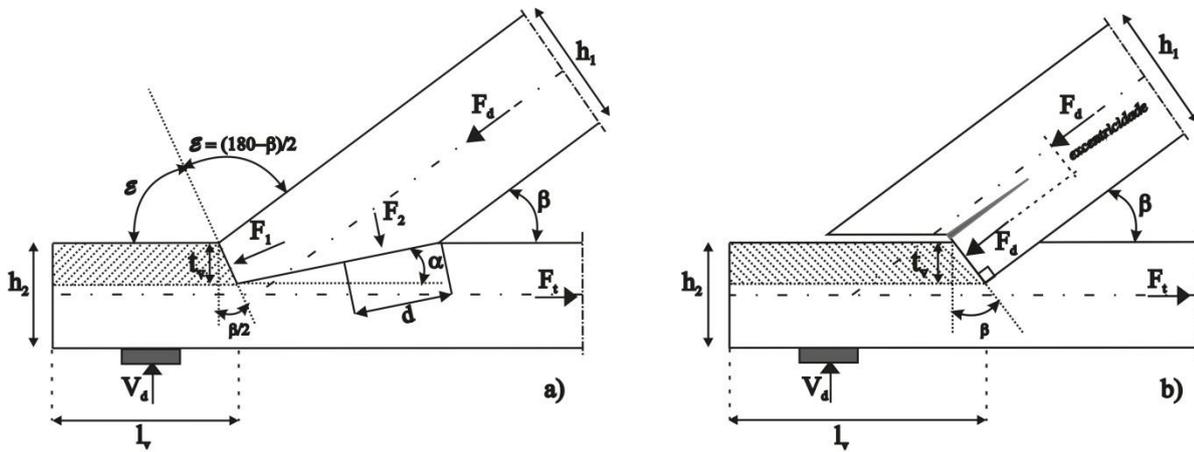


Figura 33 - Mecanismos de distribuição da força: a) dente simples; b) dente simples posterior (Descamps²).

A força F_1 , que atua na superfície frontal do entalhe, provoca concentração de tensões de compressão e pode dar origem ao esmagamento das fibras da madeira nessa área. Assim sendo, é necessário avaliar a concentração de tensões atuantes, na linha e na perna, tendo em conta a componente perpendicular à superfície do entalhe e paralela à direcção das fibras:

$$\frac{F_d \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b \cdot \frac{t_v}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}} \leq f_{c,\beta,d} \quad (\text{Dente simples}) \quad (16)$$

$$\frac{F_d}{b \cdot \frac{t_v}{\cos(\beta)}} \leq f_{c,\beta,d} \quad (\text{Dente simples posterior}) \quad (17)$$

Na superfície posterior do entalhe, sobre a qual atua a força F_2 , também se procede à verificação anteriormente descrita, dado que existe o risco de concentração de altas tensões num comprimento limitado do entalhe d . Contudo, a força F_2 é negligenciada para o entalhe com dente simples posterior (Figura 33. b)).

$$\frac{F_2}{b \cdot d} \leq f_{c,90-\alpha,d} \quad (18)$$

Onde α é o ângulo entre a direcção da força e a direcção das fibras e d é o comprimento da superfície comprimida posterior do entalhe e é dado por (Parisi et al., 2000):

$$d = \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{3}\right) \frac{t_v}{\sin\alpha} \quad (19)$$

² http://www.costfp1101.eu/images/TS%20mons/Carpentry%20Joints_Thierry%20Descamps.pdf

A secção transversal da linha é reduzida por um entalhe com profundidade t_v . Ao nível desta secção são transmitidos, por contacto, os esforços de compressão da linha para a perna. A concentração de tensões na superfície abaixo do entalhe pode levar à rotura da linha (Figura 34). Assim sendo, é necessário verificar o modo de rotura por tração na linha. Contudo, Thierry Descamps³ faz a verificação à compressão.

$$\frac{F_t}{h_2 - t_v} \leq f_{t,0,d} \quad (20)$$

Onde $f_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tracção na direcção do fio.

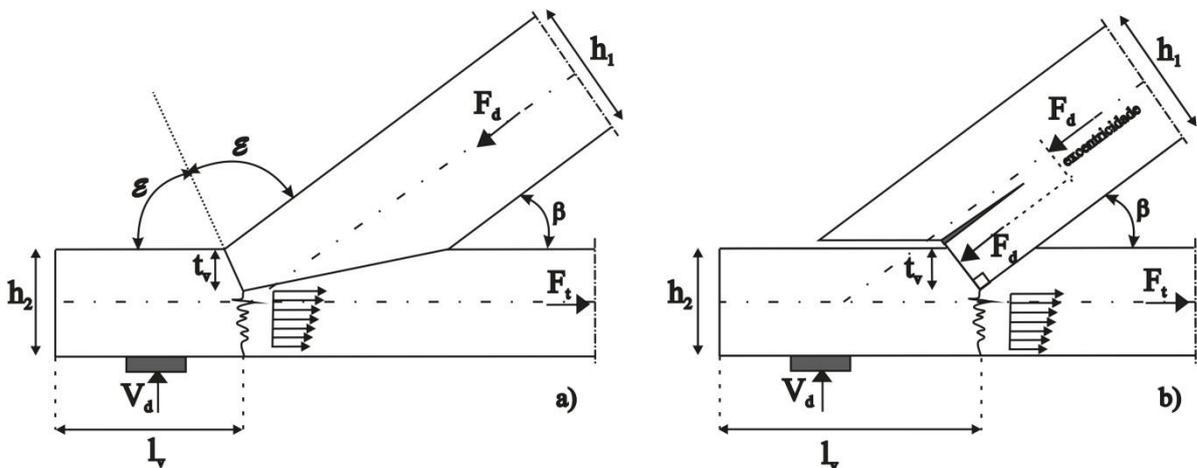


Figura 34 - Mecanismo de rotura por compressão na linha: a) dente simples; b) dente simples posterior.

A verificação do modo de rotura por corte é realizada comparando a componente horizontal do esforço axial na perna com as tensões tangenciais paralelas às fibras no talão.

$$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_v} \leq f_{v,d} \quad (21)$$

3.1.1.2.5. Documento de aplicación del CTE (Martitegui, et al., 2013a; Martitegui, et al., 2013b)

O documento de aplicação admite a existência de uma força de compressão F_d e um esforço de corte V_d (ver Figura 35). O valor da força de compressão axial é muito superior ao do

³ http://www.costfp1101.eu/images/TS%20mons/Carpentry%20Joints_Thierry%20Descamps.pdf

esforço de corte. Contudo, o valor de V_d torna-se favorável na verificação do esmagamento da superfície frontal do entalhe e do corte ao longo do talão.

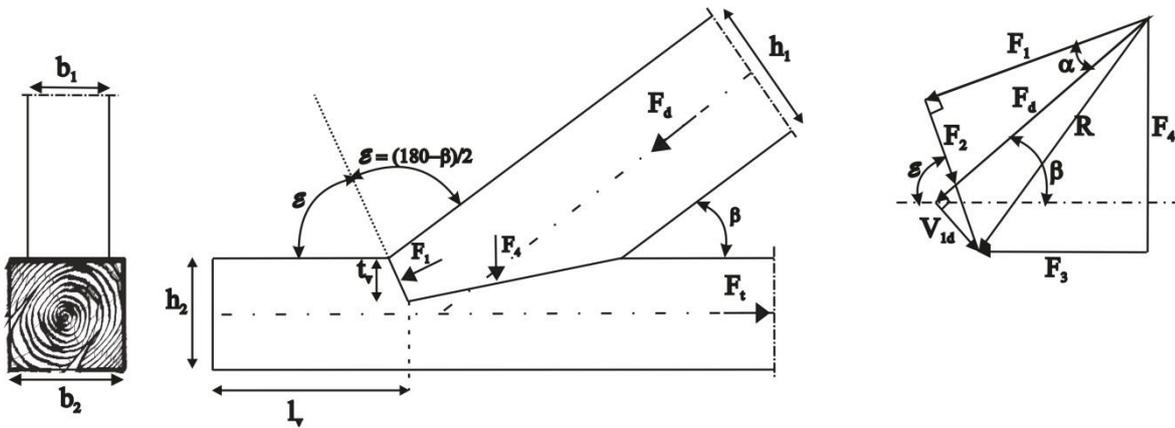


Figura 35 - Mecanismos de distribuição da força num dente simples.

A força axial divide-se em quatro componentes e são dadas por:

$$F_1 = F_d \cdot \cos \alpha - V_d \cdot \sin \alpha \quad (22)$$

(componente perpendicular à superfície frontal do entalhe)

$$F_2 = F_d \cdot \sin \alpha + V_d \cdot \cos \alpha \quad (23)$$

(componente perpendicular a F_1)

$$F_3 = F_d \cdot \cos \beta - V_d \cdot \sin \beta \quad (24)$$

(componente horizontal)

$$F_4 = F_1 \cdot \cos \alpha + F_2 \cdot \sin \alpha \quad (25)$$

(componente normal ao entalhe e que somada com o esforço de corte representa a reação de apoio)

Para verificar a segurança de uma ligação com dente simples, este documento de aplicação admite que é necessário validar um conjunto de três condições:

- Compressão oblíqua na superfície frontal do entalhe:

$$\frac{F_1}{b_1 \cdot \frac{t_v}{\cos \alpha}} \leq f_{c,\alpha,d} \quad (26)$$

- Compressão perpendicular sobre o entalhe:

$$\frac{F_4 \cdot \sin \beta}{b_1 \cdot h_1} \leq f_{c,90,d} \quad (27)$$

- Corte no talão:

$$\frac{F_3}{b_2 \cdot l_v} \leq f_{v,d} \quad (28)$$

Onde α é o ângulo entre a direcção da força e a direcção das fibras. Neste caso, α toma o valor de $\frac{\beta}{2}$.

Para que se possa considerar uma distribuição uniforme da força F_3 ao longo do talão, assume-se como necessário que o comprimento l_v não exceda o valor de $8t_v$. Contudo, na prática a tensão tangencial é máxima no vértice inferior do entalhe e diminui rapidamente ao longo do talão.

A ligação com dente duplo é constituída por um dente simples, cuja inclinação do entalhe é definida por ε , e um dente simples posterior formado por um ângulo reto. Assim sendo, a força de compressão axial forma um binário de forças que se distribuí aproximadamente de forma equivalente por cada superfície do entalhe (Figura 36).

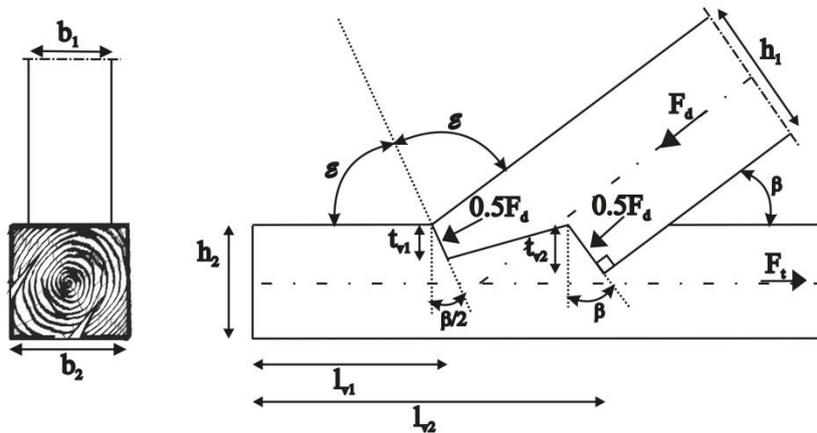


Figura 36 - Distribuição das forças pelas superfícies dos entalhes num dente duplo.

O equilíbrio de forças admitido para o dente simples é válido para o dente duplo. Contudo, o valor das forças (F_1 , F_2 , F_3 e F_4) de cada dente corresponde a metade do valor total. Neste caso, as verificações de segurança definidas por este documento de aplicação são:

- Compressão oblíqua na superfície frontal dos entalhes:

$$\frac{0.5F_1}{b_1 \cdot \frac{t_{v1}}{\cos \frac{\beta}{2}}} \leq f_{c,\beta,d} \text{ (entalhe anterior)} \quad (29)$$

$$\frac{0.5F_1}{b_1 \cdot \frac{t_{v2}}{\cos \beta}} \leq f_{c,\beta,d} \text{ (entalhe posterior)} \quad (30)$$

- Corte no talão:

$$\frac{0.5F_3}{b_2 \cdot l_{v1}} \leq f_{v,d} \text{ , onde } l_{v1} \leq 8 \cdot t_{v1} \text{ (entalhe anterior)} \quad (31)$$

$$\frac{F_3}{b_2 \cdot l_{v2}} \leq f_{v,d} \text{ , onde } 200 \leq l_{v2} \leq 8 \cdot t_{v2} \text{ (entalhe posterior)} \quad (32)$$

O valor considerado para a distribuição da força por cada entalhe admite que a ligação é executada de forma precisa, isto é, respeitando todas as condições geométricas definidas por DB-SE-M (2009). Caso não se verifique, a força de compressão axial já não se distribui de forma equivalente por cada superfície de entalhe.

Em alguns casos, o dente duplo é formado por um ângulo reto na superfície anterior e posterior do entalhe (Figura 37). Nesta situação, verifica-se que a superfície posterior está mais carregada (52%) (DB-SE-M, 2009; Martitegui et al., 2013b).

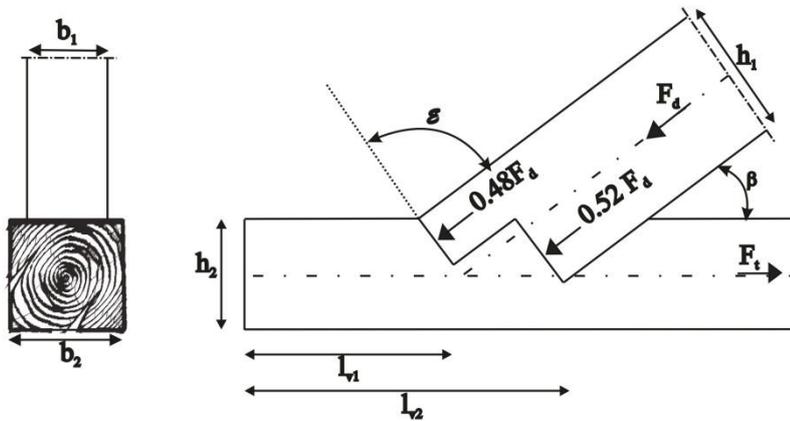


Figura 37 - Distribuição das forças pelas superfícies dos entalhes num dente duplo com ângulos retos nos entalhes.

O facto do documento de aplicação considerar que toda a área ($b_2 \times l_v$) contribui para a resistência ao corte não é totalmente correto, excepto nos casos em que $b_1 \approx b_2$. Caso a largura da linha (b_2) for superior à largura da perna (b_1), não se pode considerar a área ($b_2 \times l_v$), dado que a superfície que resiste ao corte é aproximadamente a área ($b_1 \times l_v$). Como a força atua na direção paralela às fibras, parte da área vizinha também contribui para a resistência ao corte (ver Figura 38).

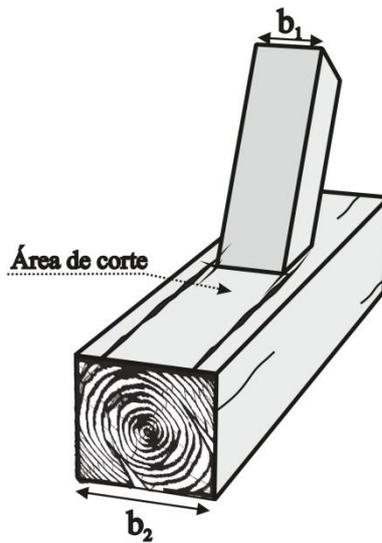


Figura 38 - Área de corte de uma ligação cuja linha tem maior largura (b_2) do que a perna (b_1).

3.1.2. Dente simples com respiga e mecha

Na ligação com respiga e mecha (Figura 39), a penetração do encaixe a uma determinada profundidade garante uma perfeita conexão entre os elementos que constituem a ligação e previne o deslizamento lateral das mesmas (Branco et al., 2008).

A capacidade resistente das ligações com respiga e mecha é dada em função do ângulo da junta, do comprimento da respiga e profundidade do encaixe (Aman et al., 2008; Judd et al., 2011). O modo de rotura da ligação localiza-se na respiga, uma vez que esta possui uma rigidez muito baixa em comparação com os outros elementos que constituem a ligação.

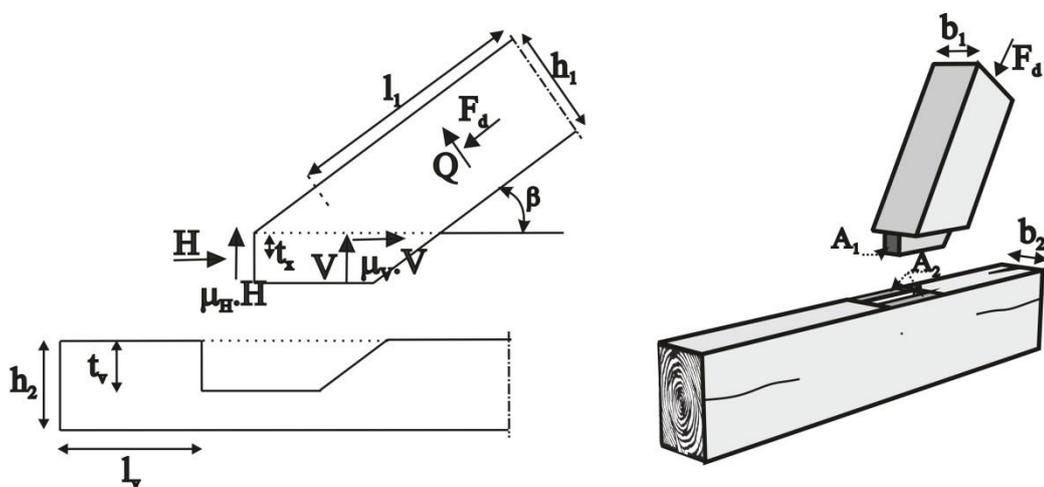


Figura 39 - Configuração e mecanismo de distribuição das forças numa ligação de dente simples com respiga e mecha (adaptado de Branco et al., 2015).

A força axial decompõe-se em duas componentes: força de compressão na superfície inferior (V) e força de compressão no lado da frente da respiga (H). Estas duas forças têm em conta o atrito entre as superfícies sob compressão e são dadas por (Koch et al., 2013):

$$V = F_d \cdot \frac{\sin \beta - \mu_H \cdot \cos \beta}{1 - \mu_H \cdot \mu_V} - F_d \cdot m \cdot \frac{\cos \beta + \mu_H \cdot \sin \beta}{1 - \mu_H \cdot \mu_V} \quad (33)$$

$$H = F_d \cdot \cos \beta + F_d \cdot m \cdot \sin \beta - \mu_V \cdot V \quad (34)$$

Onde β é o ângulo formado entre os elementos que constituem a ligação, μ_H, μ_V são os coeficientes de atrito das superfícies de contacto A_1 e A_2 , l_1 é o comprimento da perna, t_x é a distância entre a superfície inferior e ponto de carregamento, Q é a força de corte na perna e m é a razão entre F_d e Q . O valor de m é dado por:

$$m = \frac{Q}{F_d} = \frac{\left(\frac{\sin \beta - \mu_H \cdot \cos \beta}{1 - \mu_H \cdot \mu_V}\right) \left(\frac{h_1}{2 \sin \beta} \mu_V t_x\right) + \cos \beta (l_1 \sin \beta + t_x) - \sin \beta \left(l_1 \cos \beta + \frac{h_1}{2 \sin \beta}\right)}{\left(\frac{\cos \beta - \mu_H \cdot \sin \beta}{1 - \mu_H \cdot \mu_V}\right) \left(\frac{h_1}{2 \sin \beta} \mu_V t_x\right) - \sin \beta (l_1 \sin \beta + t_x) - \cos \beta \left(l_1 \cos \beta + \frac{h_1}{2 \sin \beta}\right)} \quad (35)$$

3.1.3. Considerações finais

A geometria das ligações sofreu, ao longo do tempo, uma grande evolução e evidenciam algumas diferenças entre países. Por outro lado, a espécie de madeira que se utiliza nas ligações também varia geograficamente. A evolução das ligações resulta do desenvolvimento de meios de execução apropriados, ao qual está associado maior precisão dimensional, e um processo evolutivo de tentativa erro que permitiu uma boa compreensão do comportamento estrutural das ligações.

Tendo em conta os factos anteriormente apresentados, a Tabela 5 apresenta as diferentes geometrias adoptadas nos diferentes países para dente simples e duplo.

Tabela 5 - Regras Nacionais para a definição da geometria das ligações entalhadas.

| | | Alemanha | Espanha | Holanda | Itália | Suíça | |
|--------------------------------------|-------------------------|---|--|--|---|---|--|
| Inclinação do entalhe (ϵ) | Dente simples | | $90^\circ - \frac{1}{2}\beta$ | $90^\circ - \frac{1}{2}\beta \leq \epsilon \leq 90^\circ$ | | $90^\circ - \frac{1}{2}\beta$ | |
| | Dente simples posterior | | | $90^\circ \leq \epsilon \leq 110^\circ$ | | | |
| | Dente duplo | | | $\beta \leq 50^\circ$ | | $\beta \leq 40^\circ$ | |
| Profundidade do entalhe (t_v) | Dente Simples | $t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{6}$ para $\beta > 60^\circ$ interpolação linear para $50^\circ < \beta \leq 60^\circ$ | | $t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{5}$ para $\beta > 50^\circ$ | | $t_v \leq \frac{h_2}{4}$ para $\beta \leq 50^\circ$ $t_v < \frac{h_2}{6}$ para $\beta > 60^\circ$ interpolação linear para $50^\circ < \beta \leq 60^\circ$ | |
| | Dente Duplo | | $t_{v1} \leq \begin{cases} \frac{h_2}{6} \\ t_{v2} - 10\text{mm} \end{cases}$ $t_{v2} \leq \frac{h_2}{4}$ | | $t_{v1} \leq \begin{cases} \frac{h_2}{6} \\ t_{v2} - 10\text{mm} \\ 0.8t_{v2} \end{cases}$ $t_{v2} \leq \frac{h_2}{4}$ | $t_{v1} \leq \begin{cases} \frac{h_2}{6} \\ t_{v2} - 10\text{mm} \end{cases}$ $t_{v2} \leq \frac{h_2}{4}$ | |
| Comprimento do talão (l_v) | Dente simples | $200 \leq l_v \leq 8 \cdot t_v$ | $l_v \geq 150\text{mm}$ | $l_v \leq 8 \cdot t_v$ | | $l_v \geq 150\text{mm}$ | |
| | Dente duplo | | $l_{v1} \geq 150\text{mm}$ | $l_{v1} \geq 6 \cdot t_{v1}$ | | $l_{v1} \geq 150\text{mm}$ | |
| | | | | | | | |

Nas asnas tradicionais, a linha está sujeita essencialmente a esforços de tração (e apresenta flexão devido ao seu peso próprio), a perna a esforços de compressão e corte, o pendural submetido à tração e as escoras encontram-se comprimidas. No entanto, na asna, a perna é o elemento mais solicitado e a ligação linha-perna é o ponto mais crítico devido à elevada concentração de tensões. Nesta ligação, a componente horizontal da força de compressão é transmitida da perna para a linha. Portanto, o elemento de compressão é a perna e a linha é responsável por absorver a componente horizontal deste esforço.

Embora nas recomendações anteriores, relativas à geometria e verificação da segurança, se faça apenas referência à ligação linha-perna, as mesmas também se aplicam à ligação escora-pendural, ligação escora-perna e ligação perna-pendural (ver Figura 40).

Relativamente à profundidade do entalhe da ligação escora-pendural, a DIN 1052 (2005) e Martitegui et al. (2013) admitem que não deve exceder a profundidade $t_v = h/6$, independentemente do ângulo β . Por sua vez, o ângulo formado entre a escora e o pendural ronda os 60°, enquanto entre a linha e a perna é próximo de 30° (Branco et al., 2008).

Todas as verificações de segurança se aplicam às ligações descritas na Figura 40. Contudo, no caso da ligação escora-perna, a verificação da segurança ao corte não é necessária dado que a dimensão do talão da perna é sempre superior ao recomendado.

Nas superfícies de contacto do entalhe geram-se forças de atrito que, muitas vezes para simplificar, são tidas como inexistentes nas verificações de segurança anteriores. Contudo, esta simplificação não é real e o atrito pode aumentar as tensões na superfície de corte do talão. De acordo com Branco et al. (2015), o facto de as ligações apresentarem rotura por corte frágil leva a que se considere, por parte de algumas normas (EN 1998-1:2004), um coeficiente parcial para uma propriedade de um material superior, isto é, considera-se $1.3f_{v,k}$.

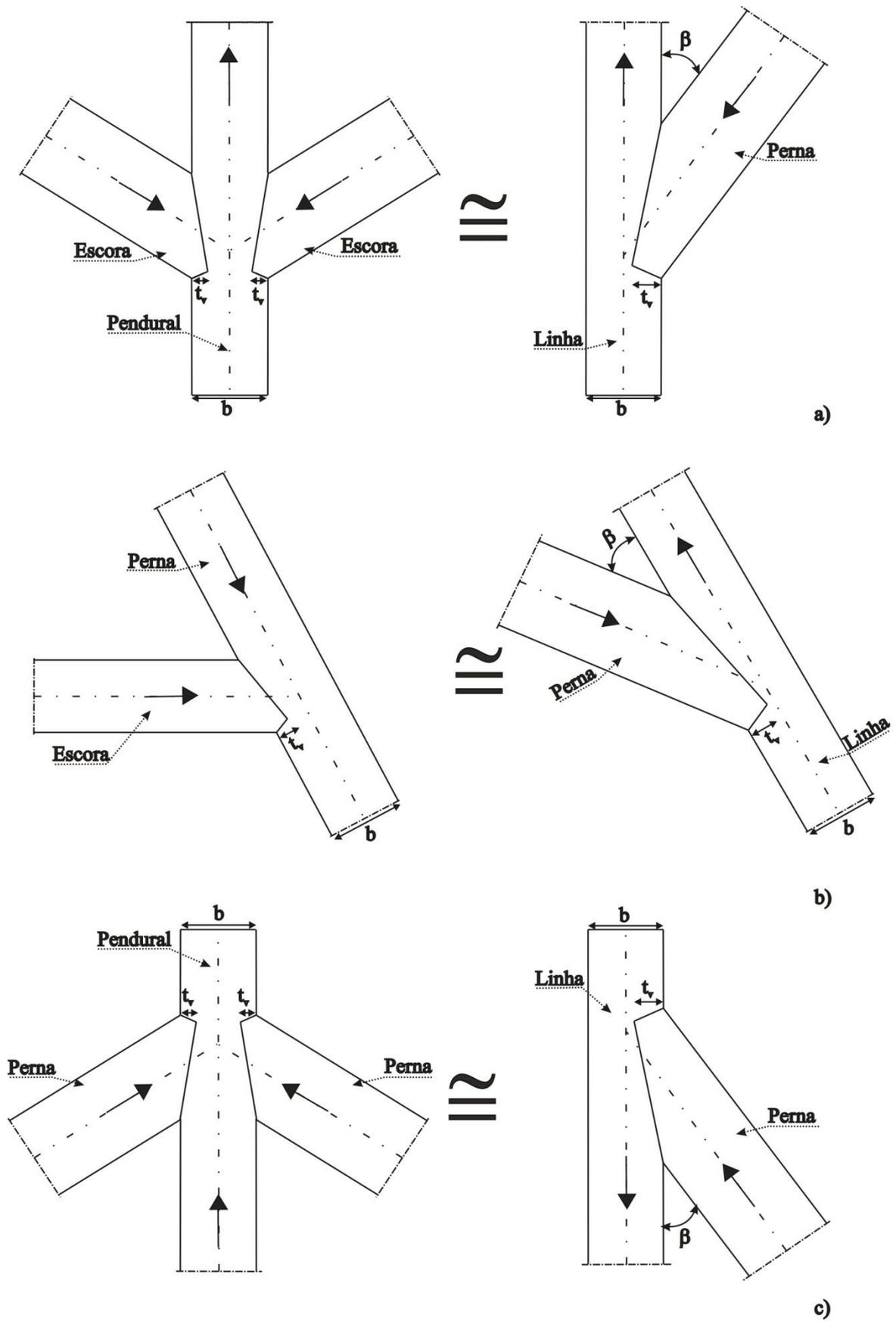


Figura 40 - Representação da ligação e respectivo modelo: a) ligação escora-pendural; b) ligação escora-perna; c) ligação perna-pendural.

O valor de cálculo da resistência à compressão a um ângulo α em relação às fibras ($f_{c,\alpha,d}$) varia consoante a norma considerada, dado que umas consideram a equação de Norris (DIN 1052, 2005) e outras a equação de Hankinson (NEN-EN 1995-1-1, 2013). A Norma Suíça (SIA 265, 2012) e Norma Espanhola (DB-SE-M, 2009) consideram uma redução de 20% no valor de $f_{c,0,d}$ na equação de Hankinson (ver Equação 7).

Tendo em conta o exemplo da Figura 41, verifica-se que a equação de Norris (Norma Alemã) apresenta valores de resistência inferiores aos da equação de Hankinson (Anexo Nacional Holandês). No entanto, a redução aplicada na equação de Hankinson, no caso da norma suíça e Espanhola, leva a que se verifiquem valores inferiores aos da equação de Norris até um ângulo $\alpha \approx 15^\circ$ em relação às fibras. Contudo, posteriormente apresenta valores superiores que tendem a igualar-se aos valores da equação de Hankinson para $\alpha = 90^\circ$.

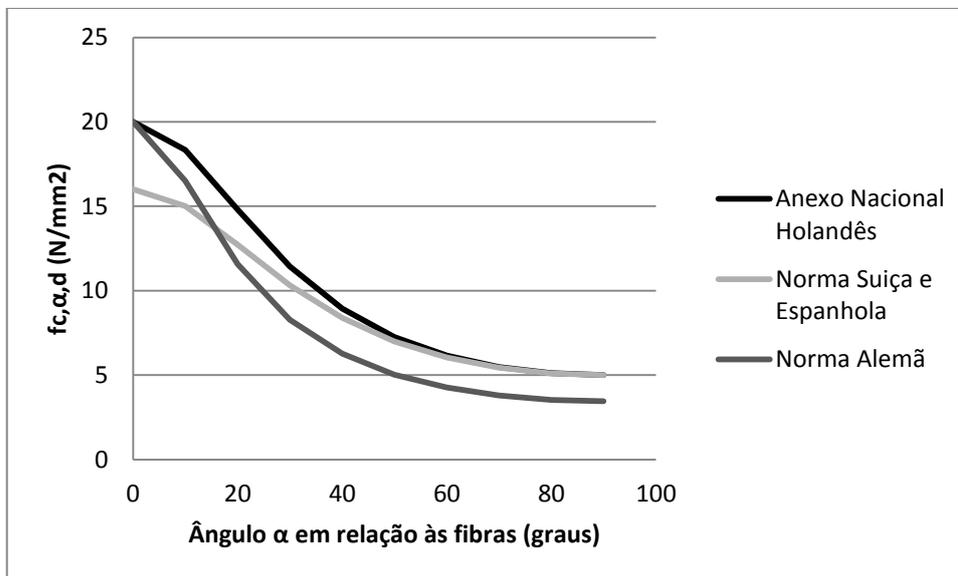


Figura 41- Comparação da valor $f_{c,\alpha,d}$ segundo as diferentes normas, admitindo que $f_{c,0,d} = 20 \text{ N/mm}^2$; $f_{c,90,d} = 2,5 \text{ N/mm}^2$; $k_{c,90} = 2$.

3.2. Cruzamentos

O cruzamento corresponde à união de dois elementos de madeira através do seu corte e sobreposição. Neste tipo de ligação os elementos encontram-se em sentido perpendicular ou em ângulo mais ou menos oblíquo.

A união das peças consiste em remover o material de cada um dos elementos da ligação, de modo a garantir que a espessura da ligação seja a mesma que a do membro com maior espessura. Normalmente, nos cruzamentos, as peças tem a mesma espessura e na área da

união é removido metade da espessura de cada uma das peças (ver Figura 4) (Branco et al., 2015).

Neste tipo de ligação as forças são transmitidas através do contacto entre os elementos de madeira, que dependendo da sua disposição podem ser esforços de compressão, tracção ou corte. Assim sendo, é necessário realizar um conjunto de verificações de segurança referentes à transmissão da força nas superfícies da ligação.

3.2.1. Cauda de Andorinha

A cauda de andorinha permite unir dois elementos de madeira, no qual o macho em forma de cauda de andorinha é inserido num entalhe, com a mesma forma, no outro elemento. Os dois elementos podem formar uma ligação em ângulo (cauda de andorinha unilateral) ou uma ligação ortogonal (cauda de andorinha) (Figura 42).

Este tipo de cruzamento é normalmente usado para reforçar a resistência à tração da ligação ou inversão de esforços, devido ao bloqueio criado pela forma trapezoidal do elemento (Branco et al., 2015). No entanto, também pode ser usado para resistir a esforços de compressão e corte.

Em ligações de grande porte, é comum usar-se pinos de madeira para garantir a estabilidade da ligação.

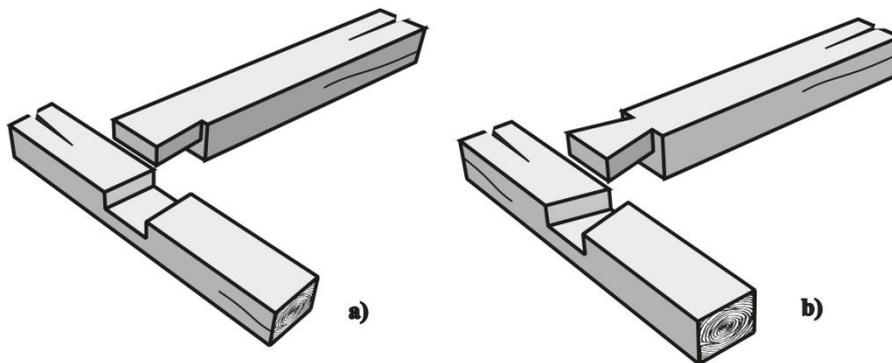


Figura 42 - Ligações de cauda de andorinha: a) unilateral; b) bilateral.

3.2.1.1. Disposição geométrica

Os parâmetros geométricos da cauda de andorinha influenciam o desempenho estrutural da ligação. Assim sendo, o processo de fabrico deve ser preciso e possuir boa qualidade de corte.

Na conceção da cauda de andorinha, existem algumas recomendações relativamente à sua disposição geométrica⁴ (ver Figura 43):

- Ambos os elementos de madeira possuem um entalhe cuja espessura é $1/2$ ou $1/3$ do elemento mais fino, dependendo do tipo de sobreposição. No caso de a sobreposição ser completa, ambos os elementos possuem um entalhe cuja espessura é $1/2$ da altura do elemento mais fino. No entanto, para evitar a diminuição da capacidade de carga devido ao enfraquecimento para metade dos elementos de madeira, pode-se adoptar uma espessura igual a $1/3$ da altura do elemento de madeira mais fino;
- O comprimento limite da cauda de andorinha é o da largura do elemento de madeira;
- A forma da cauda de andorinha é garantida por um chanfro cuja dimensão é geralmente $1/6-1/3$ da altura do elemento de madeira;
- A largura limite da cauda de andorinha deve ser a da largura do elemento de madeira.

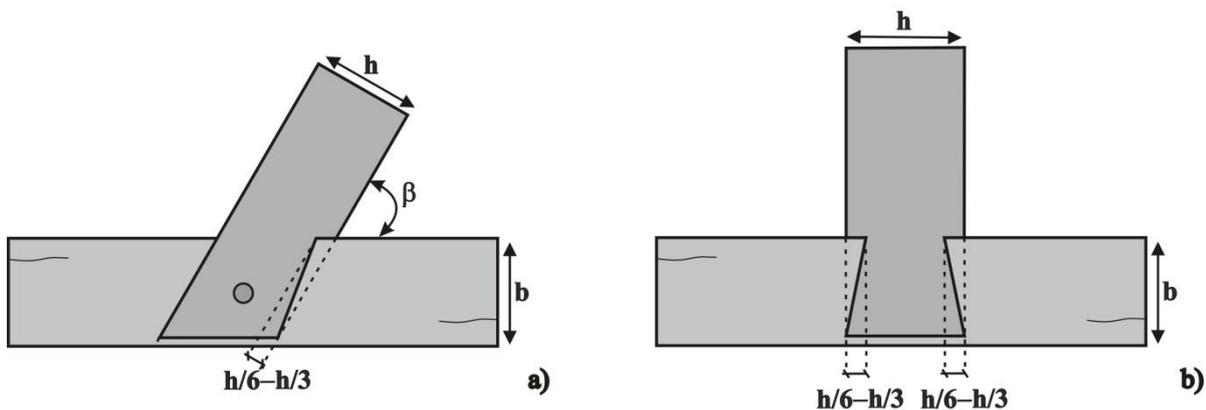


Figura 43 - Regras geométricas para a cauda de andorinha: a) unilateral; b) bilateral.

3.2.1.2. Verificação da segurança

A verificação da segurança depende da forma como a ligação é solicitada, isto é, se está sujeita a esforços de compressão, de tração ou corte (ver Figura 44).

⁴ http://www.costfp1101.eu/images/TS%20Guimaraes/2nd%20day/Sobra_Dovetail.pdf

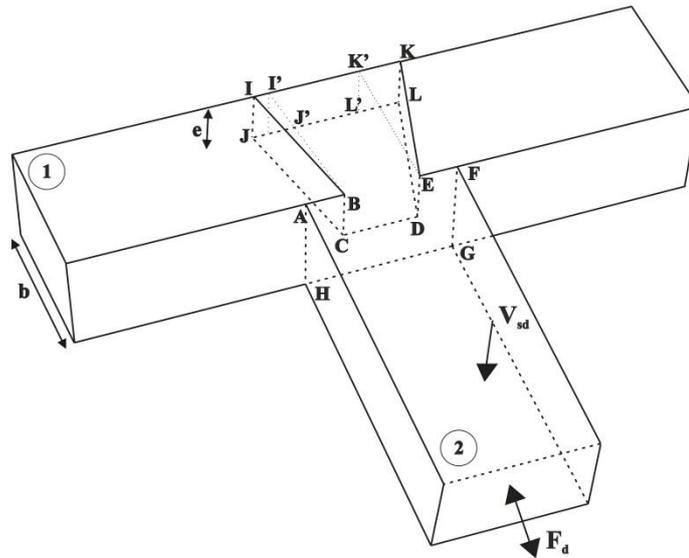


Figura 44 - Ligação de cauda de andorinha sujeita a esforços de tração, compressão ou corte.

No caso da ligação estar sujeita a esforços de compressão, as forças são transferidas por contacto direto nas áreas sob compressão, pelo que se deve garantir que a tensão de compressão na superfície de contacto dos elementos ligados é inferior à resistência à compressão perpendicular às fibras.

$$\frac{F_d}{A_c} \leq f_{c,90,d} \quad (36)$$

Onde F_d é a força de compressão e A_c é a área de compressão e é dado por:

$$A_c = A_{AFGH} - A_{BCDE} \quad (37)$$

No caso da ligação estar sujeita a esforços de tração, deverá ser verificadas três condições (ver Figura 45):

- 1) Verificação da tensão tangencial resistente:

$$\frac{F_d}{2(b_1 \times e)} \leq f_{v,d} \quad (38)$$

Onde, F_d é a força de tração; e é a espessura do entalhe.

- 2) Verificação das tensões de tração paralelas às fibras:

$$\frac{F_d}{A} \leq f_{t,0,d} \quad (39)$$

Onde A é a área da secção reduzida BCDE e $f_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração segundo a direção paralela à direção das fibras.

No caso do elemento de madeira 1 ter uma largura maior que o entalhe cauda de andorinha é necessário fazer uma outra verificação.

3) Verificação das tensões de tração perpendiculares às fibras:

$$\frac{F_d}{A} \leq f_{t,90,d} \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 \quad (40)$$

Onde A é área traccionada, $f_{t,90,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração segundo a direção perpendicular à direção das fibras, V_0 é o volume de referência e toma o valor de 0.01m^3 e V é o volume do elemento de madeira.

A área que está submetida a tensões de tração perpendiculares às fibras depende da geometria da cauda de andorinha e da orientação das fibras. No entanto, não é possível quantificar essa área dado que não existe bibliografia com essa informação.

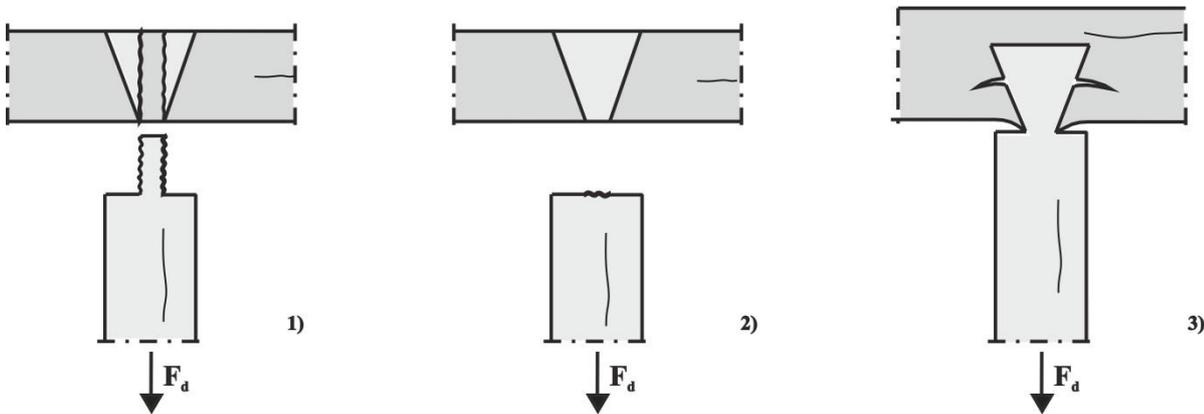


Figura 45 - Modos de rotura da ligação cauda de andorinha: 1) corte na direção das fibras; 2) tração paralela às fibras; 3) tração perpendicular às fibras.

Muitas das vezes a cauda de andorinha encontra-se solicitada ao corte, nomeadamente quando estabelece a ligação de uma viga secundária a uma viga principal. Assim sendo, podem surgir, acima da zona de contacto dos elementos de madeira, uma superfície por corte perpendicular às fibras. A verificação do modo de rotura por corte é dada por:

$$\frac{3 V_{sd}}{2 A^*} \leq f_{v,d} \quad (41)$$

Onde A^* é a área da secção reduzida BCDE.

3.2.2. Meio fio de ponta

O meio fio de ponta corresponde à união das extremidades de duas peças. Para reforçar este tipo de ligação utilizam-se pinos de madeira ou cavilhas, de modo a aumentar a rigidez do conjunto (Figura 46).

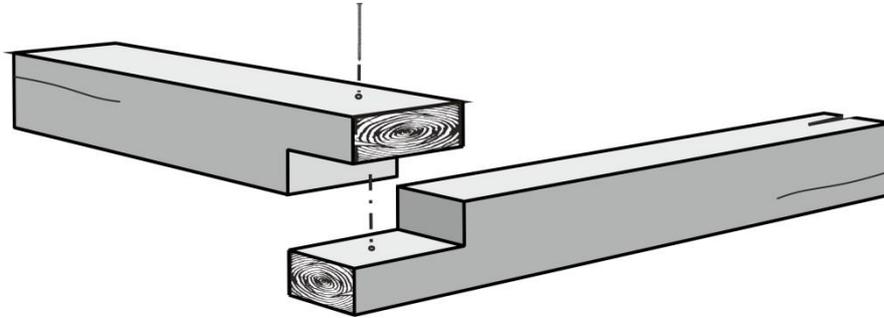


Figura 46 - Ligação meio fio de ponta.

3.2.2.1. Disposição Geométrica

Na conceção do meio fio de ponta, existem algumas recomendações relativamente à sua disposição geométrica:

- A espessura do entalhe é 1/2 da altura do elemento de madeira mais fino;
- O comprimento do entalhe é o correspondente à largura dos elementos de madeira.

3.2.2.2. Verificação da Segurança

Na verificação da segurança da ligação solicitada à compressão é necessário verificar a resistência ao esmagamento da madeira e as tensões de corte (ver Figura 47).

O esmagamento das fibras ocorre na superfície de contacto dos elementos de madeira e resulta da concentração de tensões de compressão nessa área. Esta rotura é verificada comparando a tensão atuante na superfície de contacto devido à força de compressão, com a resistência à compressão perpendicular às fibras mais a capacidade resistente do ligador. Contudo, este não é o modo de rotura mais comum.

$$\frac{F_d}{b_1 \cdot e_2} \leq f_{c,90,d} + R_{v,d} \quad (42)$$

Onde F_d é a força de compressão, b_1 é a largura do elemento de madeira 1 e e_2 é a espessura do entalhe do elemento de madeira 2.

Quando as superfícies dos elementos de madeira que constituem a ligação não estão em perfeito contacto, apenas é mobilizada a capacidade resistente do ligador para resistir ao esforço de compressão.

$$\frac{F_d}{b_1 \cdot e_1} \leq R_{v,d} \quad (43)$$

Onde F_d é a força de compressão ou tração e e_1 é a espessura do entalhe do elemento de madeira 1.

Para garantir a estabilidade da ligação utilizam-se ligadores tipo cavilha ou pinos de madeira. A transmissão de esforços neste tipo de ligadores é essencialmente por flexão do ligador e tensões de esmagamento localizado sobre a madeira (Dias et al., 2009). A verificação da segurança é realizada tendo em conta a Teoria de Johansen, presente no EC5 (EN 1995-1:2010).

Na Teoria de Johansen a capacidade resistente é dada em função do momento de cedência plástico do ligador, do valor de cálculo da resistência ao esmagamento localizado da madeira e da geometria da ligação. Além disso, baseia-se numa análise plástica limite da ligação admitindo modos de rotura que têm em conta o tipo de ligação.

O meio fio de ponta corresponde a uma ligação madeira-madeira em corte simples e o valor da resistência de cálculo da ligação por plano de corte ($R_{v,d}$) é dado pelo EC5: 8.2.2(1).

Acima da zona de contacto dos elementos de madeira, em resultado da forma como as tensões são transmitidas, pode surgir uma superfície por corte perpendicular às fibras. A verificação do modo de rotura por corte é dada por:

$$\frac{3}{2} \frac{V_{sd}}{e_1 \cdot b_1} \leq f_{v,d} \quad (44)$$

Onde V_{sd} é o esforço transversal e $f_{v,d}$ é o valor de cálculo da tensão tangencial resistente

Quando a ligação é solicitada à tração, apenas é mobilizada a capacidade resistente do ligador (ver Figura 47).

$$\frac{F_d}{b_1 \cdot e_1} \leq R_{v,d} \quad (45)$$

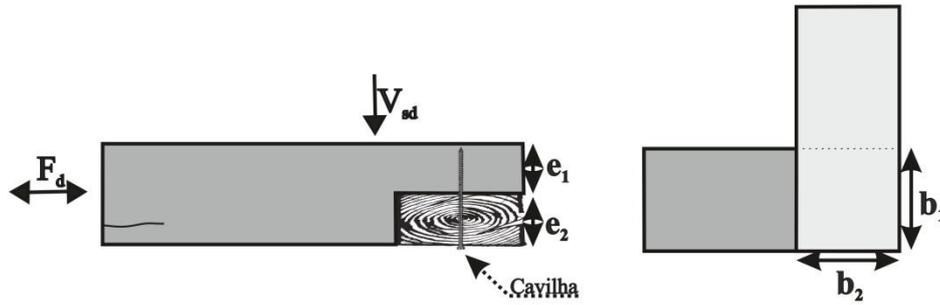


Figura 47 - Ligação meio fio de ponta solicitada à compressão ou à tração.

3.2.3. Cruz a meio fio

Na cruz a meio fio os elementos de madeira cruzam-se formando um ângulo reto, garantindo a continuidade das peças. Neste tipo de ligação, as cargas transmitem-se por contacto e, muitas das vezes, por adição de um pino de madeira ou cavilha (Figura 48).

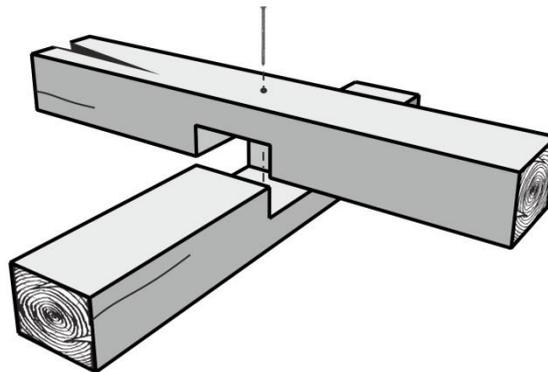


Figura 48 - Ligação cruz a meio fio.

Para aumentar a capacidade de carga dos elementos de madeira é possível adicionar uma superfície dentada a cada lado do elemento de madeira (Figura 49). A sua adição garante uma ligação mais rígida, devido ao seu ajuste, e diminui os problemas ao corte (Hirst et al., 2008).

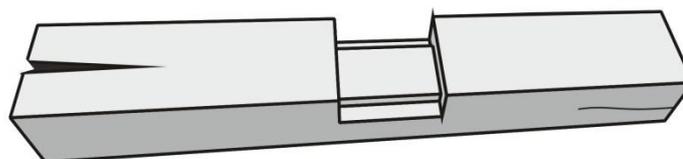


Figura 49 - Ligação cruz a meio fio com superfície dentada.

3.2.3.1. Disposição geométrica

Na conceção do meio fio de encontro, existem algumas recomendações relativamente à sua disposição geométrica:

- A espessura para o entalhe é 1/2 da altura do elemento de madeira mais fino. Contudo, para evitar a diminuição da capacidade de carga devido ao enfraquecimento para metade dos elementos de madeira, normalmente opta-se por uma espessura igual a 1/3 da altura do elemento de madeira mais fino;
- O comprimento do entalhe é o correspondente à largura do elemento de madeira.

3.2.3.2. Verificação da segurança

Neste tipo de ligação, dependendo da forma como é solicitada, existem duas áreas que podem sofrer rotura por esmagamento. Estas áreas correspondem às zonas de contacto dos elementos de madeira, que por sua vez são zonas de concentração de tensões de compressão (Figura 50).

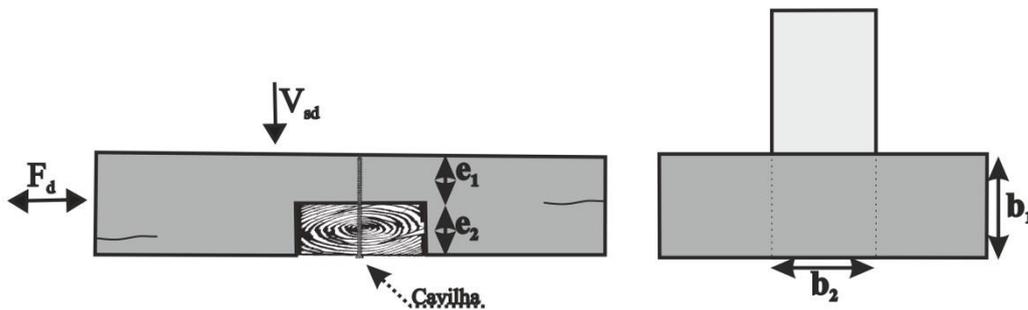


Figura 50 - Cruz a meio fio solicitada à compressão ou tração.

A verificação do modo de rotura por esmagamento é dada por:

$$\frac{F_d}{b_1 \cdot e_2} \leq f_{c,90,d} + R_{v,d} \quad (46)$$

Onde F_d é a força de compressão ou tração.

A capacidade resistente da ligação sujeita a compressão perpendicular às fibras só deve ser tida em conta se as superfícies do entalhe estiverem em perfeito contacto. Caso contrário, apenas se considera a capacidade resistente do ligador sobre a área $(b_1 \cdot e_1)$.

Quando a ligação está solicitada ao corte, é necessário garantir que não surge, acima da zona do entalhe, uma superfície por corte perpendicular às fibras.

$$\frac{3}{2} \frac{V_{sd}}{e_1 \cdot b_1} \leq f_{v,d} \quad (47)$$

3.2.4. Meio fio de encontro

O meio fio de encontro corresponde a uma ligação de cruzamento, no qual a extremidade de um dos elementos se encontra com o meio da secção de outro elemento a ligar, formando um “T” com entalhe (Figura 51).

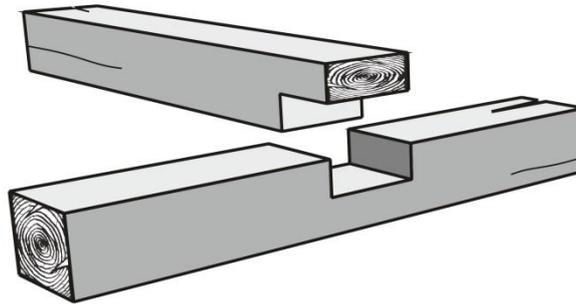


Figura 51 - Ligação meio fio de encontro.

3.2.4.1. Disposição geométrica

Na conceção do meio fio de encontro, existem algumas recomendações relativamente à sua disposição geométrica:

- A espessura do entalhe é 1/2 da altura do elemento de madeira mais fino;
- O comprimento do entalhe é o correspondente à largura dos elementos de madeira.

3.2.4.2. Verificação da segurança

Tal como na ligação meio fio de ponta, um conjunto de duas condições que devem ser verificadas (ver Figura 52):

- 1) Verificação do modo de rotura por esmagamento:

Admitindo um perfeito encaixe entre os elementos que constituem a ligação.

$$\frac{F_d}{b_1 \cdot e_2} \leq f_{c,90,d} + R_{v,d} \quad (48)$$

Caso contrário,

$$\frac{F_d}{b_1 \cdot e_1} \leq R_{v,d} \quad (49)$$

2) Verificação do modo de rotura por corte:

$$\frac{3}{2} \frac{V_{sd}}{b_1 \cdot e_1} \leq f_{v,d} \quad (50)$$

Quando a ligação é solicitada à tração, apenas é mobilizada a capacidade resistente do ligador (ver Equação 49).

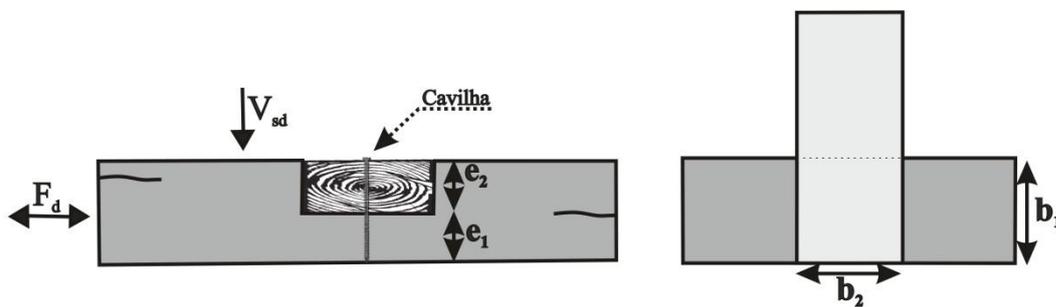


Figura 52 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação meio fio de encontro.

3.2.5. Ligação em rebaixo

A ligação em rebaixo corresponde ao cruzamento de dois elementos de madeira laterais com um elemento de madeira central, formando entre si um ângulo reto ou oblíquo. Esta ligação é normalmente utilizada em elementos submetidos à tração⁵ e possui um ligador metálico, cuja função é fixar os elementos e evitar que estas deslizem. Como é o caso da ligação pendural-linha, em que se utiliza a ligação em rebaixo, cujos elementos estão dispostos perpendicularmente entre si, para ligar dois pendurais a uma linha (ver Figura 53.a)).

Por sua vez, é comum recorrer-se à ligação em rebaixo inclinada para estabelecer a ligação perna-linha, que é solicitada à compressão (ver Figura 53.b)).

⁵http://www.infomadera.net/uploads/descargas/archivo_8_Libro%20Casas%20de%20Madera%20Medios%20de%20uni%C3%B3n.pdf

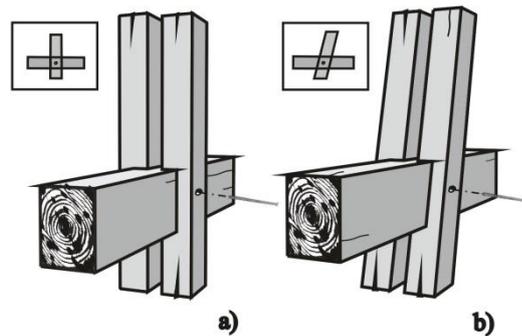


Figura 53 - a) Ligação em rebaiço; b) Ligação em rebaiço inclinada.

3.2.5.1. Disposição geométrica

Na concepção da ligação em rebaiço, as reentrâncias devem ter cerca de 1/4 ou 1/3 da espessura do elemento vertical, de modo a garantir que a transferência dos esforços se realiza pelas superfícies em contacto e que não há uma diminuição significativa da capacidade de carga do elemento vertical, devido à execução das reentrâncias. Por sua vez, a altura do entalhe é o corresponde à altura dos elementos horizontais.

3.2.5.2. Verificação da segurança

A ligação em rebaiço possui reentrâncias que permitem transmitir tensões de tração por compressão. Assim sendo, a condição de verificação do modo de rotura por esmagamento das fibras (ver Figura 54) é:

$$\frac{F_d}{b_1(e_2 + e_2)} \leq f_{c,90,d} + R_{v,d} \quad (51)$$

Onde F_d é a força de tração, b_1 é a largura do elemento de madeira vertical, e_2 é a espessura da reentrância no elemento de madeira horizontal.

A ligação em rebaiço corresponde a uma ligação madeira-madeira em corte duplo e o valor de cálculo da capacidade resistente de parafusos por plano de corte e por ligador ($R_{v,d}$) é dado pelo EC5: 8.2.3(3).

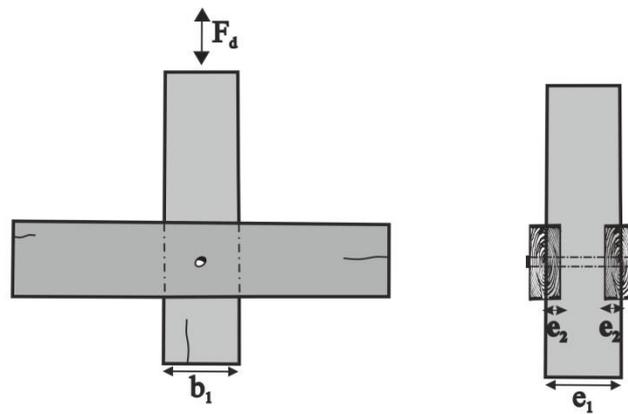


Figura 54 - Ligação em rebaixo solicitada à tração.

No caso das ligações em rebaixo submetidas à compressão, a verificação de segurança é igual à anterior uma vez que pode ocorrer esmagamento das fibras nas superfícies de contacto.

3.3. Empalmes

Os empalmes correspondem à união ponta a ponta de dois ou mais elementos de madeira, a fim de aumentar o comprimento longitudinal da peça. Esta técnica de união é reconhecida como sendo a mais segura quando se trata de ligar elementos sem recorrer à colagem. Normalmente, para garantir a estabilidade do conjunto e evitar o deslizamento das superfícies, adicionam-se pinos de madeira.

A capacidade de carga e rigidez da ligação não são as mesmas que a dos elementos que serviram à sua união ou de um único elemento com as mesmas dimensões da ligação (Hirst et al., 2008). Contudo, recomenda-se que se utilize elementos de madeira da mesma espécie e, se possível, com o mesmo comprimento (Hirst et al., 2008).

3.3.1. União a meio fio

A união a meio fio resulta da sobreposição de dois elementos de madeira, no qual se remove metade da espessura de cada elemento cujas superfícies são paralelas (ver Figura 55). O facto de ser uma ligação estruturalmente simples e fácil de fabricar, leva a que seja a mais amplamente utilizada (Hirst et al., 2008).

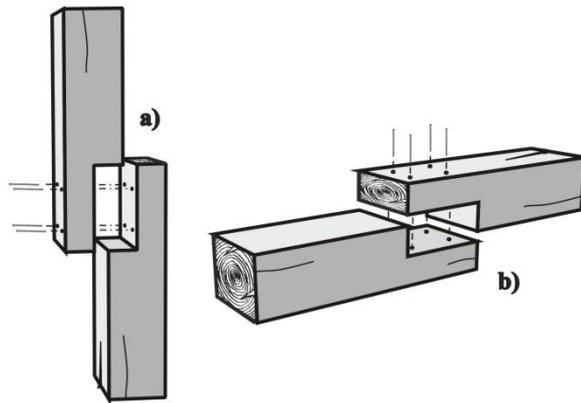


Figura 55 - Ligações de união a meio fio sujeita a esforços de: a) compressão (pilar); b) tração (tirante).

3.3.1.1. Disposição geométrica

Na conceção da união a meio fio, a espessura do entalhe é cerca de 1/2 da altura do elemento de madeira e o seu comprimento é, normalmente, o correspondente à altura do elemento.

3.3.1.2. Verificação de segurança

Quando a união a meio fio está sujeita a esforço transversal (Figura 56), geram-se tensões de tração perpendiculares às fibras. Assim sendo, para evitar a divisão da madeira é necessário colocar ligadores metálicos na zona do entalhe.

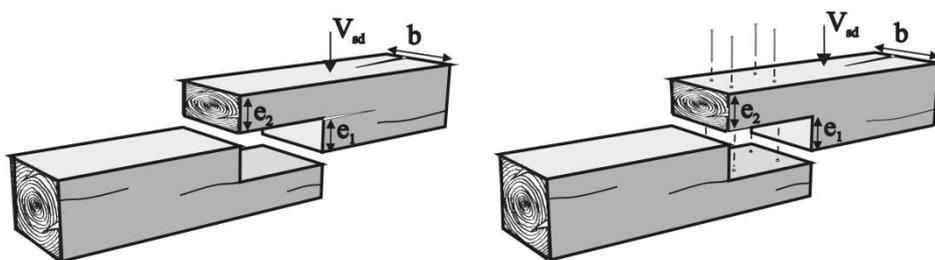


Figura 56 – União a meio fio sujeita a esforços transversos.

Acima da superfície do entalhe é necessário garantir que não ocorre a formação de uma superfície de corte perpendicular as fibras quando a ligação está sujeita a esforço transversal.

$$\frac{3}{2} \frac{V_{sd}}{e_2 \cdot b} \leq f_{v,d} \quad (52)$$

Se a união a meio fio estiver solicitada à tração, as tensões são transmitidas através dos ligadores metálicos que atravessam simultaneamente ambos os elementos a ligar (ver Figura

57). É necessário verificar que a capacidade resistente global dos ligadores metálicos é superior à solicitação a que a ligação está submetida.

$$F_d \leq R_{v,d} \times n_{ef} \quad (53)$$

Onde F_d é a força axial, b é a largura do elemento de madeira, e_1 é a espessura do entalhe do elemento de madeira 1, e_2 é a espessura do entalhe do elemento de madeira 2, $R_{v,d}$ é o valor da resistência de cálculo da ligação por plano de corte e é dado pelo EC5: 8.2.2(1) e n_{ef} é o número efectivo de ligadores numa fiada paralela ao fio. Segundo o EC5 (EN 1995-1:2005), o valor de n_{ef} é dado por:

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0.9} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right. \quad (54)$$

Onde a_1 é o espaçamento entre cavilhas na direcção do fio, d é o diâmetro das cavilhas e n é o número de cavilhas numa fiada.

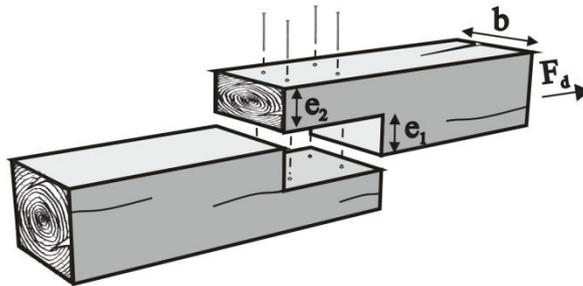


Figura 57 - União a meio fio sujeita a esforços de tração.

No entanto, se a ligação estiver sujeita a esforços de compressão (ver Figura 58), as tensões são transmitidas essencialmente por contacto entre as superfícies dos elementos de madeira ligados. No entanto, as cavilhas utilizadas para estabilizar a ligação também oferecem resistência na transmissão das tensões. Assim sendo, a verificação da segurança é realizada comparando a tensão atuante na superfície de contacto devido à força de compressão, com a resistência à compressão paralela às fibras e a capacidade resistente dos ligadores.

$$\frac{F_d}{b \cdot (e_1 + e_2)} \leq f_{c,0,d} + R_{v,d} \times n_{ef} \quad (55)$$

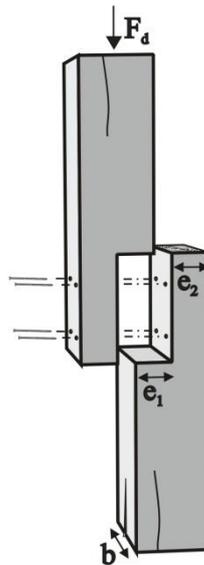


Figura 58 - União a meio fio sujeita a esforços de compressão.

3.3.2. União com macho

A união com macho é formada por uma respiga e uma mecha (Figura 59.a)). Um dos elementos de madeira possui na extremidade uma respiga quadrangular que é inserida na mecha, que se encontra na outra peça, com a forma correspondente. Esta ligação é utilizada em peças submetidas à compressão e possui um bom desempenho a esforços de torção.

Para evitar que haja infiltrações para o interior da mecha, é recomendado que esta seja executada no elemento superior.

A união com macho falso é uma variante da ligação anterior, sendo que ambos os elementos de madeira encontram-se ligados pelo macho que é inserido na mecha quadrangular executado em cada um deles (Figura 59.b)).

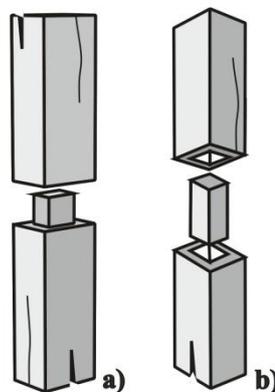


Figura 59 – a) União com macho; b) União com macho falso.

3.3.2.1. Disposição geométrica

Os parâmetros geométricos da união com macho influenciam o desempenho estrutural da ligação. Por exemplo, se a respiga não tiver altura suficiente, a ligação irá ter um mau funcionamento à flexão e compressão e pode haver divisão prematura do respiga. Assim sendo, existem algumas recomendações relativamente à disposição geométrica desta ligação que devem ser cumpridas:

- A espessura da respiga é 1/2 da espessura do elemento de madeira e deve estar centrado na peça;
- A espessura das áreas adjacentes à respiga possuem 1/4 da espessura do elemento de madeira;
- O comprimento da mecha deve ser cerca de 2/3 da espessura do elemento de madeira;
- A mecha possui a mesma dimensão da respiga, para garantir um encaixe perfeito.

3.3.2.2. Verificação da segurança

Na união com macho, a transmissão de esforços é realizada através de tensões compressão entre as superfícies de contacto (Figura 60). A verificação da segurança, admitindo que a extremidade da mecha não está em contacto com a respiga, é dada por:

$$\frac{F_d}{A_{ABCD} - A_{IJML}} \leq f_{c,0,d} \quad (56)$$

Onde F_d é a força de compressão, A_{ABCD} é a área da secção reduzida ABCD (Figura 53) e A_{IJML} é a área da secção reduzida IJML.

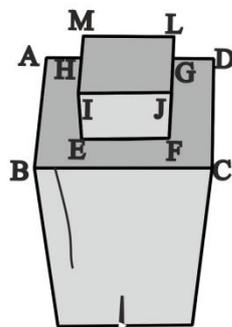


Figura 60 - Definição das áreas comprimidas na ligação união com macho.

Caso a mecha esteja apoiada na respiga, é necessário ter em conta a área de contacto A_{IJML} .

3.3.3. União com respiga e mecha

A união com respiga e mecha permite a ligação de dois elementos de madeira. Sendo que um dos elementos de madeira possui na sua extremidade uma respiga e o outro possui a mecha, que corresponde ao furo de encaixe (Figura 60).

Na união com respiga e mecha sujeito a esforços de tração usam-se pinos de madeira de modo a garantir a estabilidade do conjunto.

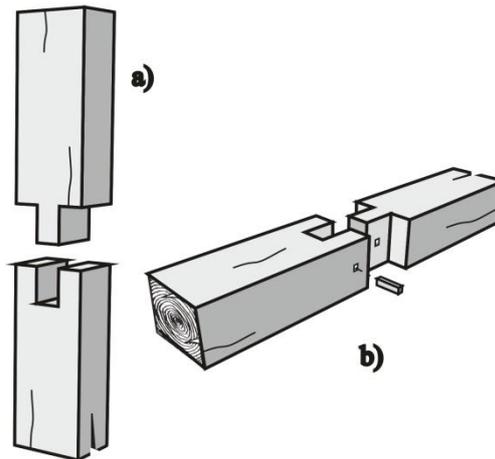


Figura 60 - União com respiga e mecha sujeito a: a) esforços de compressão; b) esforços de tração.

3.3.3.1. Disposição geométrica

Na conceção da união com respiga e mecha, existem algumas recomendações relativamente à sua disposição geométrica:

- A respiga geralmente possui uma largura igual a $1/3$ da espessura do elemento de madeira;
- O comprimento da mecha deve garantir a estabilidade da ligação e deve ser adequado à espessura do elemento de madeira, por vezes, adopta-se $2/3$ da espessura do elemento de madeira;
- A mecha possui a mesma dimensão da respiga, para garantir um encaixe perfeito.

3.3.3.2. Verificação da segurança

A verificação da segurança depende da forma como a ligação é solicitada, isto é, se está sujeita a esforços de compressão ou de tração.

Se a ligação estiver sujeita a esforços de compressão, pode ocorrer esmagamento das fibras na superfície de contacto (Figura 61).

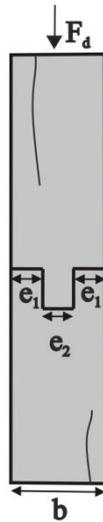


Figura 61 - União com respiga e mecha sujeita a esforços de compressão.

Assim sendo, a verificação da segurança é realizada comparando a tensão atuante na superfície de contacto devido à força de compressão, com a resistência à compressão paralela às fibras.

$$\frac{F_d}{b \cdot (e_1 + e_1) + b \cdot e_2} \leq f_{c,0,d} \quad (57)$$

Onde F_d é a força de compressão; b é a largura do elemento de madeira, e_1 é a espessura das superfícies adjacentes à respiga e e_2 é a largura da respiga.

Se a união com respiga e mecha é solicitada a tração, a transmissão de esforços é realizada através de um ligador (pino de madeira ou cavilha) que atravessa os elementos de madeira na zona do entalhe (ver Figura 62). Para garantir a segurança da ligação, é necessário verificar que a capacidade resistente ligador metálico é superior à solicitação a que a ligação está submetida.

$$F_d \leq R_{v,d} \quad (58)$$

Onde $R_{v,d}$ é o valor da resistência de cálculo da ligação por plano de corte e é dado pelo EC5: 8.2.2(1).

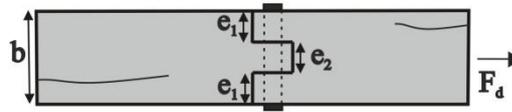


Figura 62 - União com respiga e mecha sujeita a esforços de tração.

3.3.4. União a meio fio com entalhe e entalhe a meia madeira

O entalhe a meia madeira (ver Figura 64) resulta de correções à geometria da união a meio fio com entalhe (Figura 63), com o objetivo de melhorar o seu desempenho. Este tipo de empalme une dois elementos de madeira, sendo que cada um deles possui um entalhe na extremidade que garante a estabilidade da ligação. Estes entalhes surgem da necessidade de neutralizar os efeitos de flexão provocados pela excentricidade em relação à força. Outra opção é o recurso a braçadeiras metálicas colocadas em ambas as extremidades, evitando assim as tensões de tração perpendiculares às fibras e a possibilidade de rotura frágil.

No ponto central, a ligação pode conter um batente cuja função é auxiliar a transferência dos esforços e garantir a conexão/ajuste do conjunto (Gabarda, 2011). No batente deve ser utilizada uma madeira de elevada resistência à compressão, dado que a tensão superficial de contacto por compressão é perpendicular à direção das suas fibras (Aguíelles et al., 2013).

Esta ligação é utilizada em peças submetidas a esforços de tração.

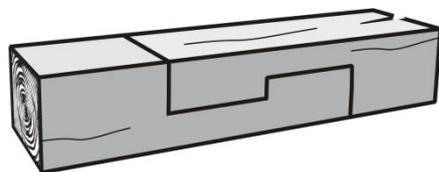


Figura 63 – União a meio fio com entalhe.

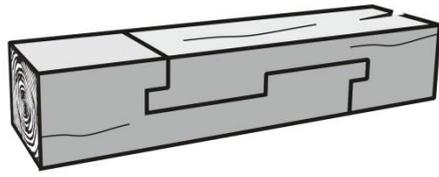


Figura 64 - Entalhe a meia madeira.

3.3.4.1. Disposição geométrica

Para definir a geometria do entalhe, Martitegui et al. (2013a) refere um conjunto de procedimentos de otimização do tamanho da união a meio fio com entalhe (ver Figura 65):

- 1) Escolhe-se o valor da relação t/h ;
- 2) Definem-se os critérios de esgotamento por flexão-tração e compressão localizada, perpendicular ou paralela às fibras dependendo da presença ou não do batente, a partir das seguintes fórmulas:

$$\frac{F_d}{b \cdot h} \leq k_2; \frac{F_d}{b \cdot h \cdot f_{t,0,d}} = i_{t,0} \leq \frac{k_2}{f_{t,0,d}} = k_3; i_{t,0} \leq k_3 \quad (59)$$

$$\frac{F_d}{t \cdot b \cdot f_{c,d}} = \frac{F_d}{k_1 \cdot h \cdot b \cdot f_{c,d}} \leq 1; \frac{F_d}{b \cdot h \cdot f_{t,0,d}} \leq \frac{k_1 \cdot f_{c,d}}{f_{t,0,d}}; i_{t,0} \leq \frac{k_1 \cdot f_{c,d}}{f_{t,0,d}} \quad (60)$$

Onde, F_d é a força de tração, $i_{t,0}$ é o critério máximo de esgotamento por tração da secção total do entalhe (valor bruto), t é a altura do batente, l é o comprimento do plano de corte na direção das fibras; k_1 é a razão entre t e h e $f_{c,d}$ é a resistência de cálculo à compressão paralela (sem batente) ou perpendicular (com batente).

- 3) De modo a obter a situação mais eficaz, tendo em conta valores de t/h diferentes do definido no passo 1, repete-se o passo 2 para garantir que os critérios de esgotamento sejam iguais;
- 4) O valor mínimo da relação l/h , que garante a resistência ao corte, é obtido a partir da seguinte equação:

$$\frac{l}{h} \geq i_{t,0} \cdot \frac{f_{t,0,d}}{f_{v,d}} \quad (61)$$

- 5) Verificar que a condição $l \leq 8 \cdot t$ é satisfeita.

A Tabela 6 indica valores resumo, para as espécies resinosas, do procedimento anterior para a união a meio fio com entalhe sem ou com batente (neste caso admite uma

resistência de compressão perpendicular às fibras de 8 N/mm², que corresponde a uma classe resistente D30).

Tabela 6 - Pré-dimensionamento da união a meio fio com entalhe definida por Martitegui et al. (2013a).

| | | $i_{t,0} \leq$ | $\frac{l}{h} \geq$ | $\frac{l}{h} =$ |
|------------|--------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| C14 | Sem batente | 0.15 | 0.41 | 0.08 |
| | Com batente | 0.13 | 0.35 | 0.13 |
| C16 | Sem batente | 0.14 | 0.43 | 0.08 |
| | Com batente | 0.12 | 0.38 | 0.12 |
| C18 | Sem batente | 0.14 | 0.45 | 0.10 |
| | Com batente | 0.12 | 0.38 | 0.16 |
| C22 | Sem batente | 0.14 | 0.49 | 0.10 |
| | Com batente | 0.11 | 0.38 | 0.19 |
| C24 | Sem batente | 0.14 | 0.50 | 0.10 |
| | Com batente | 0.11 | 0.38 | 0.19 |
| C30 | Sem batente | 0.14 | 0.62 | 0.11 |
| | Com batente | 0.10 | 0.44 | 0.22 |

3.3.4.2. Verificação da segurança

Na união a meio fio com entalhe, a transmissão dos esforços de tração entre as duas peças é realizada por uma compressão perpendicular às fibras na superfície do batente (ver Figura 65). Deste modo, a tensão de compressão deve ser inferior à resistência à compressão na direção perpendicular à direção das fibras:

$$\frac{F_d}{b \cdot t} \leq f_{c,90,d} \quad (62)$$

Se a ligação não possuir batente, a compressão será paralela às fibras $f_{c,0,d}$ na superfície do entalhe que impede o deslizamento do conjunto.

No plano da superfície ($b \times l$) há transmissão de tensões tangenciais de corte devido às forças de tração. Segundo Aira et al. (2015), as tensões de corte apresentam uma distribuição não linear, pelo que é necessário considerar um fator de redução da resistência ao corte para que se possa admitir uma distribuição uniforme da tensão.

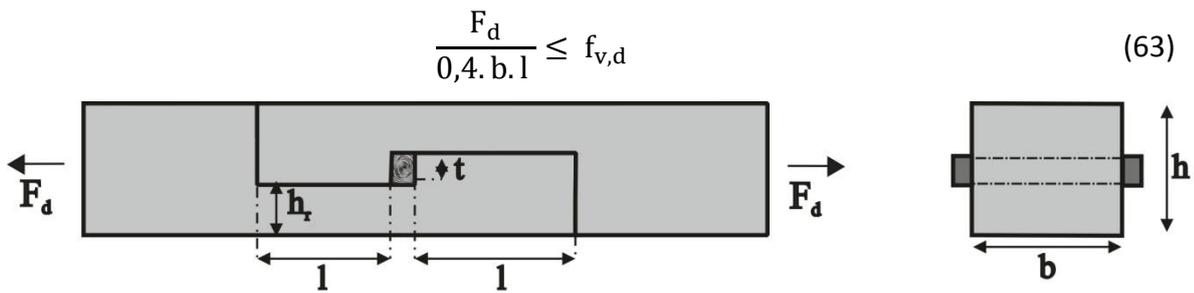


Figura 65 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação da união a meio fio com entalhe.

O entalhe a meia madeira apresenta as mesmas verificações de segurança da união a meio fio com entalhe.

3.3.5. Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria

O entalhe com ângulo e batente a meia esquadria é semelhante à ligação anterior, com a diferença que o entalhe é oblíquo (Figura 66).

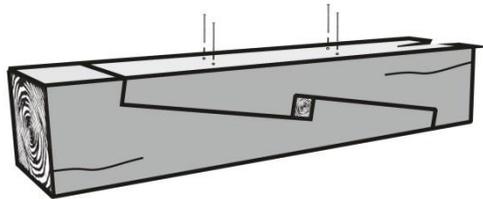


Figura 66 - Entalhe com ângulo e batente a meia esquadria.

A capacidade de transmissão de esforços desta ligação é muito inferior ao entalhe a meia madeira com batente, uma vez que possui uma superfície menor para resistir às tensões tangenciais (Figura 67). Contudo, a resistência pode dobrar se a ligação for um entalhe com ângulo e dois batentes a meia esquadria (Gabarda, 2011).

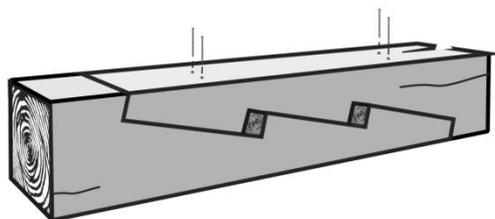


Figura 67 - Entalhe com ângulo e dois batentes a meia esquadria.

Normalmente, neste tipo de ligação, são usados pinos de madeira ou cavilhas para fortalecer a ligação e evitar a tendência a rodar.

3.3.5.1. Disposição geométrica

Na conceção do entalhe com ângulo e batente a meia esquadria, existem algumas recomendações relativamente à sua disposição geométrica (Figura 68):

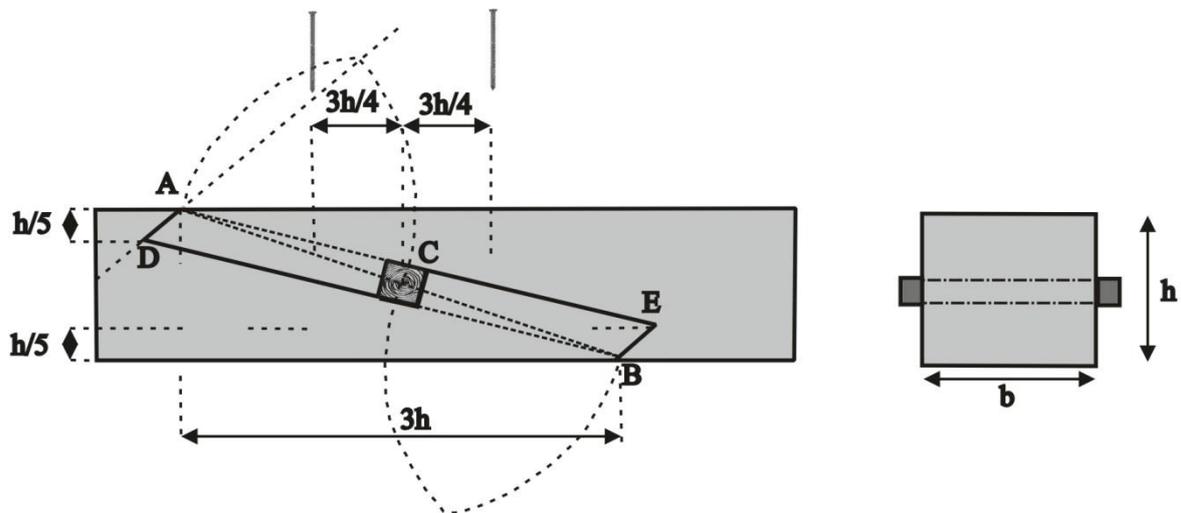


Figura 68 - Definição da geometria do entalhe com ângulo e batente a meia esquadria.
(Montero, 1990).

Para definir a geometria do entalhe Montero (1990) indica os seguintes passos:

- 1) O ponto A e B definem as extremidades do entalhe e correspondem a três vezes a altura do elemento de madeira;
- 2) O ponto C define o eixo central do entalhe e corresponde ao ponto central da linha média que une o ponto A e B;
- 3) A partir dos pontos A e C traçam-se arcos de raio igual à distância, de modo a obter um triângulo equilátero;
- 4) O segmento AD corresponde à extensão de um dos lados do triângulo e termina com a interseção com a reta traçada a 1/5 da altura do elemento;
- 5) No ponto B e C repete-se o mesmo procedimento e define-se o segmento BE;
- 6) As linhas de corte definem-se unindo os pontos A-E e D-B.

É aconselhável ter cavilhas a $\frac{3}{4}$ da altura do elemento de madeira, em cada lado do eixo da ligação, colocados transversalmente.

No caso do entalhe com ângulo e com duplo batente a meia esquadria o procedimento é semelhante ao anterior. Contudo, a distância entre o ponto A e B é o correspondente a 4.5 h e as cavilhas devem localizar-se a 1.5 h, em cada lado do eixo da ligação (ver Figura 69).

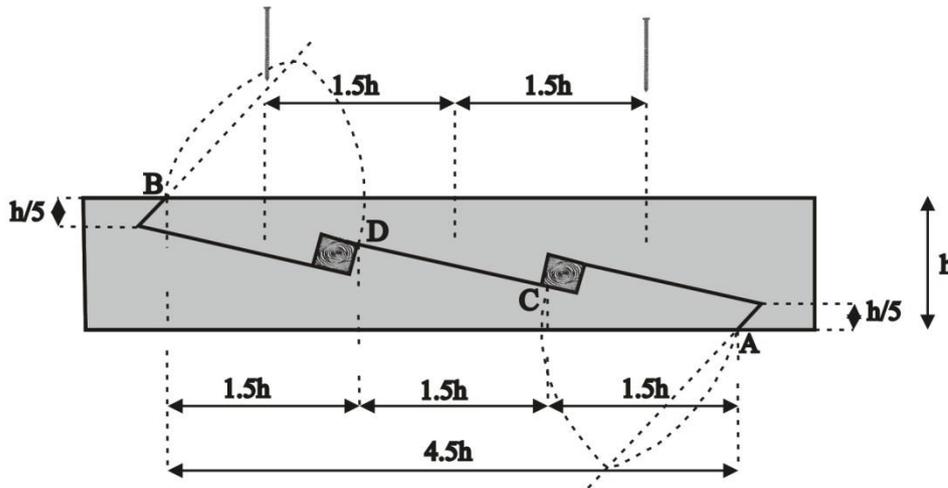


Figura 69- Definição da geometria do entalhe com ângulo e com duplo batente a meia esquadria (Montero, 1990).

3.3.5.2. Verificação da segurança

Na verificação da segurança da ligação é necessário fazer duas verificações (ver Figura 70):

- 1) Verificação à compressão no batente:

$$\frac{F_d \cdot \cos \beta}{b \cdot t} \leq f_{c,\beta,d} \quad (64)$$

- 2) Verificação ao corte:

$$\frac{F_d}{b \cdot l} \leq f_{v,d} \quad (65)$$

Onde F_d é a força de tração, t é a altura do batente e l é o comprimento do plano de corte na direção das fibras e é dado por:

$$l = \frac{\sin \beta}{t} \quad (66)$$

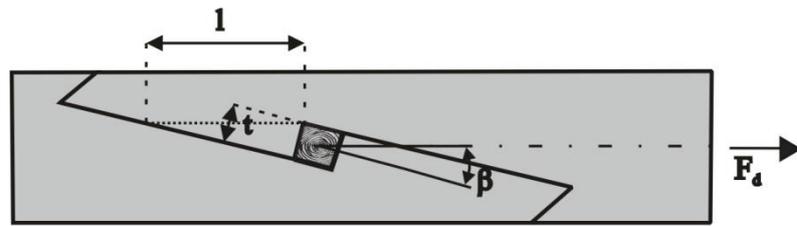


Figura 70 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação de entalhe com ângulo e com batente a meia esquadria.

No caso do entalhe com ângulo e duplo batente a meia esquadria, considera-se a divisão do esforço axial em duas forças $F_1 = F_2 = F_d/2$ (Figura 71).

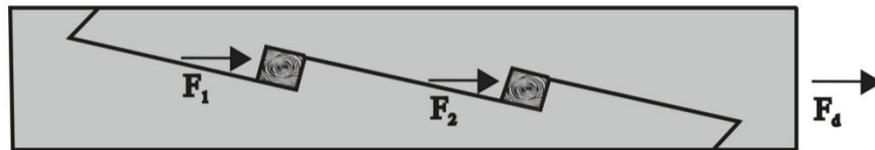


Figura 71 - Mecanismo de distribuição das forças na ligação de entalhe com ângulo e com duplo batente a meia esquadria.

Capítulo 4

REFORÇO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA

4.1. Principais patologias que afetam a madeira

As condições ambientais às quais a madeira está exposta, a durabilidade natural da espécie, o modo de concepção dos elementos construtivos e as condições de aplicação, influenciam a durabilidade da estrutura de madeira (Reis et al., 2008).

Nos elementos de madeira, a degradação começa pela camada mais externa e sensível, o borne. E a zona de maior risco é o local da peça onde houve corte transversal em relação às fibras, uma vez que este plano de corte apresenta grande porosidade e capacidade de absorção.

Em seguida, são apresentados os principais fatores que tornam a madeira, material natural e abiótico, suscetível de sofrer degradação por parte de agente biológicos, abióticos e em resultado de erros de concepção ou uso. Além disso, também são expostos alguns dos problemas associados às ligações tradicionais de madeira.

4.1.1. Acção de Agentes biológicos

As patologias de origem biológica são a causa mais frequente de deterioração das estruturas de madeira, e caracterizam-se por perda de resistência e rigidez dos elementos e das ligações (Cruz, 2011).

A durabilidade natural da madeira é uma característica intrínseca da espécie e depende das suas características anatómicas (Cruz, 2011). Além disso, está diretamente relacionada com a susceptibilidade da madeira sofrer um ataque por parte dos agentes biológicos. A norma EN350-2 (2006) contém informações sobre a durabilidade natural da madeira e da impregnabilidade de espécies de acordo com a sua importância na Europa.

Embora a resistência natural face ao ataque de organismos vivos seja um fator preponderante, o desenvolvimento de cada um desses organismos implica a existência de condições higrotérmicas ambientais favoráveis.

Os principais agentes de degradação biológica são os fungos xilófagos, os insetos de ciclo larvar (carunchos), os insetos sociais (térmitas) e xilófagos marinhos.

4.1.1.1. Fungos xilófagos

Os fungos xilófagos dividem-se em dois grupos: os fungos de podridão e os fungos cromogéneos e bolores.

O ataque da madeira por fungos xilófagos só ocorre em presença de teores de humidade acima dos 18-20%, com um valor ótimo compreendido entre 25 e 55% (Arriaga et al., 2002), e na presença de oxigénio. Fator que explica a razão pela qual as madeiras permanentemente imersas em água não são atacadas por estes agentes biológicos.

A presença de fungos cromogéneos e bolores num elemento de madeira pode ser detetada por alteração da coloração do material. Estes agentes biológicos atacam superficialmente a madeira, pelo que não originam perda significativa da resistência da madeira (Feio et al., 2005). O problema que lhe está associado é o facto de criarem condições para se desenvolverem os fungos de podridão.

Os fungos de podridão alimentam-se diretamente da parede celular da madeira e conduzem à perda de massa e de resistência mecânica da madeira, podendo levar à completa destruição do elemento. Além disso, também provocam a alteração da cor e do aspeto do elemento.

Os fungos de podridão dividem-se em três tipos (Figura 72), em função da cor e do aspeto que apresenta a madeira atacada: podridão branda, podridão branca (ou fibrosa) e podridão parda (ou cúbica). A podridão parda é a mais destrutiva, promove predominantemente a degradação de madeiras macias⁶ (Pala, 2007), apresenta cor castanha e provoca a fratura dos elementos em formas cúbicas, sendo apenas detetável numa fase avançada da sua evolução (o correspondente a um défice de resistência superior a 80% (Bastos, 2011)). A podridão branca tende a degradar a celulose, hemicelulose e lenhina das madeiras duras⁷ (Pala, 2007), tem uma aparência fibrosa, apresenta cor mais clara e degradação mais lenta em relação à podridão parda. Por fim, a podridão branda caracteriza-se por uma cor esbranquiçada e esponjosa, é provocada por fungos capazes de degradar a lenhino-celulose, e trata-se de um processo lento que ocorre da superfície para o interior da madeira. Este tipo de fungos ataca normalmente a madeira que esteja permanentemente exposta à humedificação.

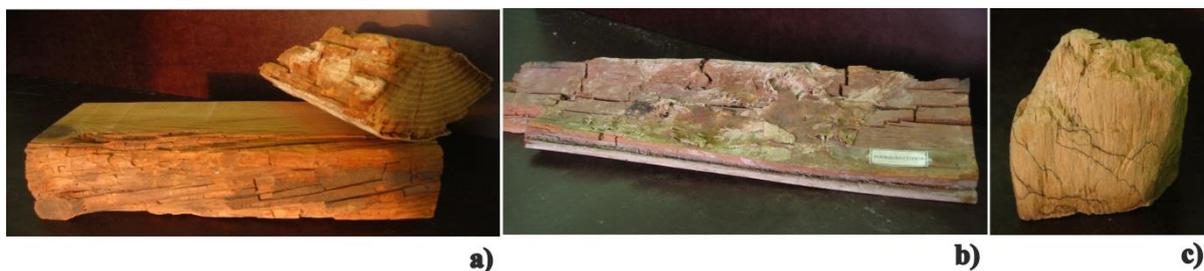


Figura 72- Ataque da madeira por fungos xilófagos: a) podridão branda; b) podridão parda; c) podridão branca.

4.1.1.2. Insetos de ciclo larvar

Os insetos de ciclo larvar, vulgarmente designados por carunchos, atacam geralmente a madeira seca e a sua presença é denunciada pela presença de orifícios, eventualmente acompanhados por serrim.

⁶ Madeiras macias são madeiras de latifoleadas (por exemplo: carvalho), produzidas por árvores gimnospermas que se caracterizam por deixarem as sementes cair no chão sem nenhuma cobertura e terem folhas persistentes.

⁷ Madeiras duras são madeiras de coníferas (por exemplo: pinho), produzidas por árvores angiospermas que se caracterizam por produzir sementes com algum tipo de cobertura e terem folhas caducas.

A madeira é atacada por carunchos, frequentemente na camada periférica do borne, havendo uma redução de resistência que resulta da perda de secção. As alterações na resistência da madeira e as condições favoráveis ao ataque dependem da espécie dos insetos de ciclo larvar.

Em Portugal, os insetos de ciclo larvar mais comuns são: *Hylotrupes bajulus* L. (caruncho grande), *Anobium punctatum* (caruncho corrente), *Lyctus brunneus* Steph (traça) e *Pselactus spadix* H. (gorgulho) (Faria, 2004).

4.1.1.2.1. Insetos sociais

Os insetos sociais, em particular as térmitas subterrâneas, constituem um dos principais fatores de degradação de estruturas de madeira (Dias et al., 2009). Atacam a madeira com teores de humidade superiores a 20%, mas não saturada, e em contacto com o solo ou próximo dele.

As térmitas subterrâneas provocam a degradação da madeira no sentido das fibras, formando galerias. Este tipo de agente biológico pode aduzir consequências graves para a segurança da estrutura, dado que as peças podem apresentar um bom aspeto exterior e estar em fases muito avançadas de destruição.

4.1.1.2.2. Xilófagos marinhos

Os xilófagos marinhos incluem os moluscos (degradação interior da madeira) e os crustáceos (degradação superficial da madeira). Correspodem aos agentes biológicos com uma acção mais desvatadora sobre a madeira, isto é, maior quantidade de madeira degradada por unidade de tempo (Freitas, 2012).

O ataque da madeira por parte dos xilófagos marinhos é influenciada pelo teor em oxigénio, temperatura e salinidade da água. A durabilidade natural da madeira, em relação a este tipo de agentes biológicos, aumenta com o seu teor em sílica.

4.1.2. Ação de agentes abióticos

Os agentes abióticos que provocam a degradação da madeira são: os agentes atmosféricos, os agentes químicos e o fogo.

4.1.2.1. Agentes atmosféricos

A degradação, por parte dos agentes atmosféricos, encontra-se normalmente associada à ação da radiação solar, da chuva e dos ciclos de secagem/ humidificação. Atendendo ao grau de exposição da madeira, a ação destes agentes resulta numa deterioração física (empenamento, curvatura, fendas, remoção de material lenhoso) e química (alteração dos seus constituintes-lenhina). A deterioração provocada pelos agentes atmosféricos não coloca em causa a segurança da estrutura, contudo pode conduzir a que se gerem condições para a ocorrência de outros tipos de degradação, nomeadamente a biológica (Dias et al., 2009). Conclui-se que a degradação provocada pelos agentes atmosféricos não apresenta a gravidade de outros agentes (biológicos e ação do fogo).

Dependendo do grau de exposição da madeira, e por ação dos raios ultravioletas e infravermelhos, a decomposição superficial da lenhina pode ser mais ou menos rápida. Os raios ultravioletas, por fotodegradação, provocam a decomposição química e gradual da lenhina. A deterioração observada passa por uma alteração da cor, que numa primeira fase acentua a cor característica da madeira e subsequentemente a mudança gradual para uma cor superficial acinzentada. Os raios infravermelhos, aquecem superficialmente a madeira e, provocam o desenvolvimento de fendas longitudinais devido aos ciclos de humidade e secagem excessiva.

Os elementos de madeira, quando expostos à ação direta da chuva, sofrem um processo de lixiviação e remoção do material lenhoso, expondo a madeira sã aos agentes atmosféricos. Além disso, a chuva também provoca variações volumétricas. As variações bruscas de humidade geram tensões que dão origem à abertura de fendas e conseqüente diminuição das características mecânicas da madeira.

A deterioração provocada pelos agentes atmosféricos é lenta, pelo que afeta sobretudo a madeira do ponto de vista estético (Cruz et al., 2005).

4.1.2.2. Agentes químicos

Geralmente, o ataque da madeira por parte de agentes químicos traduz-se por alteração da cor ao nível da superfície. Contudo, dependendo da espécie da madeira, em ambientes mais agressivos pode sofrer alterações mais significativas (Arriaga et al., 2002).

4.1.2.3. Fogo

A madeira quando sujeita à ação do fogo sofre combustão (Figura 73), o que se traduz por uma perda de resistência mecânica por parte da superfície carbonizada. Esta superfície funciona como isolante em relação à madeira interior, retardando o processo e evitando que esta seja atacada pelo fogo.

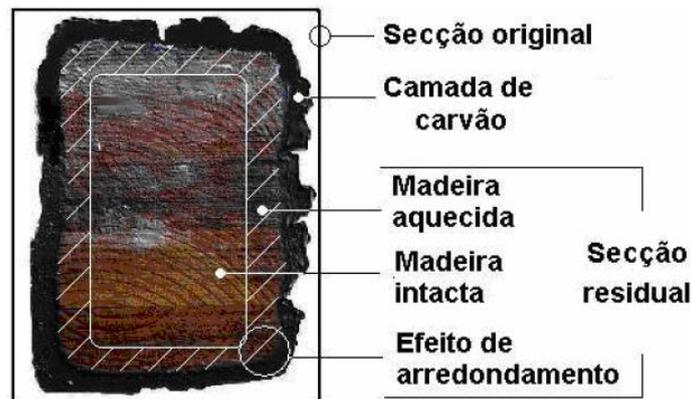


Figura 73- Seção de um elemento de madeira exposto ao fogo durante 30 minutos (Pereira, 2009).

4.1.3. Anomalias estruturais

A perda de aptidão das estruturas está relacionada com a degradação do material, capacidade de carga inadequada face às novas exigências de desempenho ou mudança de uso, falta de manutenção, defeitos associados ao material ou concepção e aos anos de serviço.

A ação dos agentes biológicos é uma das principais causas de degradação das estruturas de madeira, e muitas das vezes só ocorre em presença de deficiências de construção, que podem causar danos estruturais graves e por em causa a estabilidade da estrutura. As deficiências de construção, neste caso, estão relacionadas com a possibilidade de ocorrerem infiltrações (em resultado de coberturas mal concebidas ou mal conservadas) ou migração de água do solo para os elementos de madeira.

Segundo Faria (2009), as principais anomalias estruturais que põem em causa aptidão estrutural da estrutura são: secção insuficiente; deformações ou vibrações excessivas; falhas nas ligações; problemas nos apoios; ausência de contraventamento; perda de homogeneidade ou integridade das seções causada, por exemplo, pela abertura de fendas profundas.

As secções podem ser insuficientes em resultado do ataque por agentes biológicos dos elementos de madeira ou do aumento das cargas aplicadas, associadas a mudanças de uso. Este tipo de anomalia é, muitas das vezes, detetado devido a deformações excessivas ou presença de fendas.

As deformações excessivas dos elementos surgem do uso de madeira verde (madeira que ainda não atingiu condições estruturais adequadas), secções insuficientes dos elementos, efeitos de fluência ou envelhecimento dos elementos de madeira (pequenas roturas, fendas, etc.).

Por sua vez, a abertura de fendas resulta de processos de secagem não controlados com consequentes retracções da madeira, assimetria de cargas ou transmissão de esforços não previstos no dimensionamento (Branco, 2014). Além disso, reduz a capacidade de carga dos elementos e propicia a degradação da madeira, dado que facilita as infiltrações de humidade e o ataque por parte de agentes biológicos.

Por fim, a falta de contraventamento manifesta-se por uma deformação no plano normal ao da estrutura/elemento e conduz à perda de verticalidade ou colapso progressivo da estrutura.

4.1.3.1. Ligações tradicionais de madeira

Os problemas das ligações tradicionais de madeira estão normalmente associadas ao mau dimensionamento, erros de pormenorização, deformações elevadas e má execução das ligações, ao nível da geometria e/ou elementos de ligação.

No caso das ligações tradicionais que recorrem a conectores metálicos, muitas das vezes, os problemas surgem do insuficiente espaçamento ou afastamento dos ligadores e de elementos subdimensionados ou em falta.

O contacto entre os elementos é um fator preponderante no bom funcionamento do conjunto, uma vez que a existência de folgas nos entalhes (problemas de montagem, falta de rigor na execução das peças ou retração da madeira) reduz de forma drástica a rigidez e resistência das ligações. Além disso, provoca uma grande concentração de tensões na superfície do entalhe em contacto.

Por vezes, erros na concepção dos entalhes também levam a que o funcionamento da ligação seja posto em causa, uma vez que a geometria não se adequa aos esforços que deveriam ser transmitidos.

Um outro tipo de problema é o uso de empalmes, emenda longitudinal com reduzida rigidez e resistência, em locais desadequados, isto é, em locais onde os esforços atuantes são significativos. A presença de empalmes em elementos sujeitos a esforços de tração e/ou flexão, pode levar a grandes deformações e conduzir à rotura da ligação, havendo separação dos elementos.

Nas ligações tradicionais que recorrem ao uso de ligadores, é recorrente verificar-se a falta deste elementos, em resultado de uma execução descuidada ou dimensionamento desadequado. A capacidade resistente da ligação depende do número de ligadores e da sua disposição, pelo que na falta de algum ligador a distribuição de esforços é diferente da inicialmente prevista, o que leva à deformação da ligação e dos ligadores, podendo por vezes ocorrer a rotura dos ligadores por excesso de carga. Também é recorrente a falta de anilhas ou o uso de anilhas demasiado pequenas, o que leva ao esmagamento transversal da madeira sob as cabeças e porcas dos parafusos devido à elevada concentração de tensões e deformações sob a madeira, que deveriam ser acomodadas e distribuídas pela área correspondente à anilha (Dias et al., 2009).

Outro problema relacionado com o uso de ligadores metálicos é o facto de não serem respeitadas as regras, estabelecidas pelo EC5, relativamente ao espaçamento entre ligadores e distância dos ligadores aos bordos e topos da madeira. O espaçamento inadequado dos ligadores pode levar à propagação de fendas e roturas frágeis em bloco. Por sua vez, a insuficiente distância dos ligadores aos bordos e topos da madeira faz com que as tensões introduzidas pelos ligadores não se distribuam de forma adequada pela madeira envolvente, o que pode levar a roturas frágeis por corte ou tração perpendicular às fibras (Dias et al., 2009).

No caso das ligações que recorrem a pinos de madeira, o principal problema surge dos movimentos dimensionais que ocorrem quando os elementos de madeira são aplicados na estrutura com um teor de água superior àquele que vão atingir em serviço. Assim sendo, ao variar o teor de humidade dos elementos, varia também as suas dimensões, o que leva a que o pino de madeira fique solto e não cumpra a sua função na ligação. Outro problema importante, é o facto de o pino de madeira por vezes não ter deformação plástica suficiente, o que limita a capacidade da ligação se deformar e conseqüentemente da estrutura, dado que a

deformação plástica da estrutura é dependente da capacidade de deformação plástica da ligação. Em estruturas sujeitas à acção sísmica, este problema limita o uso deste tipo de ligadores, dado que a capacidade da estrutura de madeira de dissipar energia é fortemente afectada.

Em suma, as ligações correspondem a pontos críticos, que obrigam a uma elevada compreensão do seu comportamento e constituição, e qualquer dano pode por em causa o comportamento global da estrutura. Daí a necessidade de diagnosticar e analisar as anomalias existentes e escolher a intervenção que melhor se adequa, para proceder à reparação.

4.2. Intervenções de reparação e reforço das ligações tradicionais de madeira

As estruturas de madeira antigas são complexas e apresentam patologias, ao nível dos elementos estruturais, em particular, ao nível das ligações, fruto do envelhecimento ou degradação prematura em resultado de causas acidentais, erros de projeto ou de execução.

Tendo-se verificado ao longo de vários anos a falta de conhecimento e a dificuldade em compreender as estruturas existente, tornaram-se frequentes as reparações, substituições (remoção completa de elementos ou sub-estruturas) e reforços excessivamente conservadores. Contudo, a necessidade de preservar o valor histórico e cultural originou a que a substituição por estruturas integralmente novas desse lugar a um processo criterioso de recuperação.

Independentemente da solução de intervenção escolhida é necessário assegurar e manter a autenticidade da estrutura de madeira. A ICOMOS (2002) apresenta um conjunto de recomendações fundamentais de conservação, das quais se destacam:

- Qualquer intervenção na estrutura deve ser reversível e seguir o princípio da intervenção mínima. Reversível garantindo que intervenções futuras não são comprometidas e permitir a remoção e substituição por medidas mais adequadas. Por sua vez, a intervenção deve ser mínima para que o valor histórico e cultural seja preservado;
- As características e compatibilidades entre os materiais existentes e os novos devem ser conhecidas, evitando efeitos indesejáveis no futuro;

- A base de qualquer medida de intervenção sobre a estrutura é a avaliação da segurança e compreensão do valor histórico e cultural da estrutura.

Tendo em conta o último ponto, antes de qualquer intervenção, é necessário fazer uma avaliação cuidada do material, da rigidez e resistência de toda a estrutura, em especial das ligações. O conhecimento das características do madeira usada é essencial, dado que a espécie de madeira utilizada em cada elemento depende muitas das vezes da sua função/ carga que tem de suportar. Além disso, importa também avaliar a secção resistente, uma vez que fornece indicações do estado de conservação da estrutura, aspecto importante se a estrutura se mantiver em serviço, e permite verificar se é necessário substituir uma parte ou a totalidade do elemento.

As intervenções sobre as estruturas de madeira podem ser de dois tipos: reparação ou reforço. As intervenções de reparação permitem a recuperação da capacidade resistente e desempenho original da estrutura, e traduz-se pela regeneração e conservação da estrutura sem variações substâncias no seu comportamento estrutural. Por sua vez, as intervenções de reforço permitem resolver deficiências da estrutura original, aumentando a capacidade de carga da estrutura (por diferente uso) e limitando/diminuindo as deformações da mesma (Costa, 2009). Muitas das vezes, as ações de reforço também surgem da necessidade alteração do uso da estrutura ou da inadequação às normas de segurança atuais. Seja qual for o objetivo, existem sempre diferentes técnicas para proceder à intervenção. Contudo, após uma análise completa à estrutura, é necessário fazer uma análise das vantagens e desvantagens de cada técnica, tendo em conta o objetivo da intervenção, o grau de degradação, os custos e as características da estrutura (Costa, 2009).

As intervenções de reparação e/ou reforço deverão ser realizadas após o devido tratamento da madeira, incluindo a secagem dos materiais e o tratamento preservador das madeiras a manter no local. Esta medida de tratamento envolve uma ação curativa, que permite evitar a progressão da degradação por parte de agentes biológicos, e um ação preventiva, que impede a retorno dos problemas.

Como os principais problemas de instabilidade, em estruturas de madeira, se encontram localizados nas ligações e representa uma taxa de incidência de 80% (Itany et al., 1983), interessa focalizar as acções de reparação e reforço sobre estes elementos de ligação, dado que estas desempenham um papel crucial no comportamento global da estrutura.

4.2.1. Intervenções de reparação das ligações

O processo de reparação das ligações envolve um conjunto de intervenções ligeiras que permitem repor e/ou melhorar o seu desempenho, sem alterar significativamente o modo de funcionamento da ligação e da estrutura. Contudo, estas medidas de reparação não garantem a verificação das condições de segurança das ligações tradicionais.

Nas ligações onde na construção original, ou intervenções anteriores, se recorreu ao uso de ligadores metálicos, é comum ser necessário a consolidação da ligação por reaperto dos ligadores, substituição de elementos partidos ou deteriorados por corrosão e tratamento do metal. A substituição dos elementos metálicos deve contemplar o aumento do diâmetro e/ou número dos ligadores (Dias et al., 2009).

No caso dos elementos estruturais que utilizam parafusos como elementos de ligação, por vezes, é necessário proceder ao reaperto dos parafusos devido às folgas que são introduzidas nas anilhas em resultado da retracção da madeira.

O aparecimento de fendas em estruturas de madeira antigas surge, normalmente de movimentos dimensionais, assimetria de cargas ou transmissão de esforços não previstos. Algumas destas fendas encontram-se em zonas próximas de ligações entre elementos, o que pode condicionar o bom funcionamento da ligação. Assim sendo, para colmatar a evolução das fendas e os problemas que podem estar associados (risco de degradação biológica) é necessário proceder à sua reparação (cintagem, injeção de cola, etc).

As entregas são zonas que estão sujeitas a degradação por ação dos agentes biológicos, podendo se tornar vulneráveis às tensões tangenciais de corte. No caso das asnas em madeira, a entrega da linha é muitas vezes afectada pela redução da secção resistente. O que pode influenciar o comportamento da ligação linha-perna e, por sua vez, da estrutura, dado que nas asnas esta ligação é a que está sujeita a esforços mais elevados. Nas situações em que se rompe esta ligação, a parede passa a receber impulsos horizontais, dado que se perde o efeito de asna (Branco, 2014). Portanto, é importante proceder a intervenções de reparação das entregas (ver Figura 74), nomeadamente, remoção da madeira degradada e aplicação de emendas de madeira por madeira sã ligada à madeira existente por elementos de fixação. Além disso, deve ser garantido que a madeira usada na reparação da entrega é da mesma espécie que a existente.

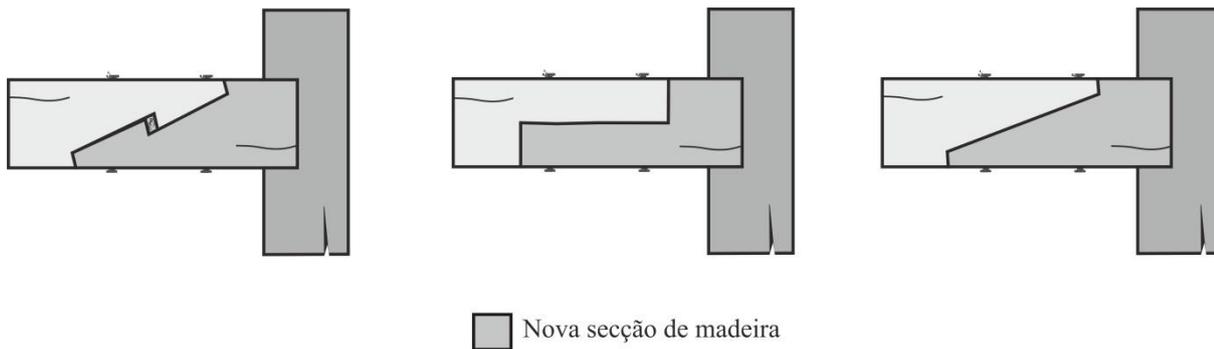


Figura 74 - Intervenções de reparação das entregas com recurso a empalmes.

4.2.2. Intervenções de reforço das ligações

O reforço das ligações tradicionais tem como objetivo o aumento da capacidade de carga e da capacidade dissipativa da ligação, sem alterar significativamente o seu comportamento original. A excessiva rigidificação de uma ligação tradicional (Figura 75) deve ser evitado, e reservado apenas para casos de extrema degradação onde existe risco de colapso, dado que pode conduzir a uma redistribuição de esforços diferente do originalmente concebidos e alterar a resposta da estrutura (Pinto, 2008; Dias et al., 2009). No caso do reforço impedir o livre movimento da madeira, pode levar a que ocorra uma rotura frágil da estrutura pelos elementos ligados, especialmente nos elementos traccionados.



Figura 75 - Rigidificação de uma ligação originalmente semi-rígida (Piazza, 2004).

As ligações tradicionais de madeira, nomeadamente as ligações de dente simples, apresentam um comportamento semi-rígido (Parisi, et al., 2000; Branco, et al., 2005; Branco, et al., 2006b), garantido pela plastificação (esmagamento) da madeira à compressão. Este comportamento é difícil de modelar com precisão por causa da dependência das características geométricas e mecânicas do elemento em cada ligação (Piazza, 2007). No caso

das estruturas antigas de madeira, os elementos estruturais que constituem as ligações apresentam uma grande variabilidade de inércias, o que dificulta a correta definição do modelo estrutural e a adoção de um valor adequado de rigidez para as ligações.

Uma das formas de perceber o comportamento das ligações tradicionais de madeira, consiste em definir a estrutura como um conjunto de molas equivalentes nas ligações tendo em conta o sistema de suporte (Figura 76). Como cada ligação tem o seu modo de transferir as cargas, com este modelo é possível avaliar onde vão ocorrer as principais tensões, bem como o comportamento e a deformada de cada ligação (Branco et al., 2015).

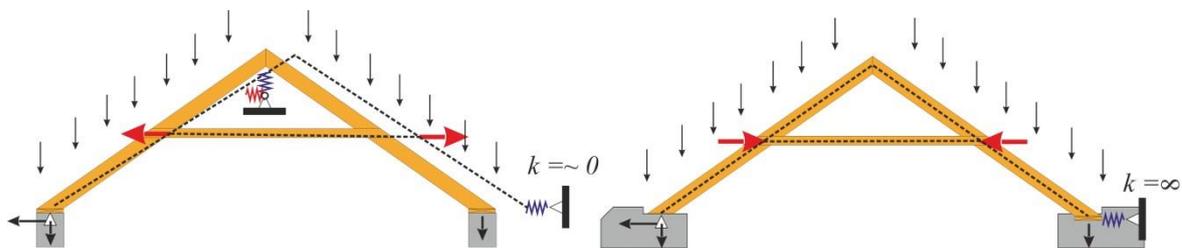


Figura 76 - Comportamento das ligações tradicionais de madeira definidas como um conjunto de molas equivalentes (Branco et al., 2015).

A dificuldade em prever o real comportamento das ligações e da estrutura, associado ao facto do reforço das ligações tradicionais não ser normalizado, por vezes conduz a intervenções exageradamente do lado da segurança e a um diferencial de rigidez que influencia o comportamento global da estrutura. Assim sendo, o primeiro passo de uma intervenção de reforço é definir o modelo do conjunto, para avaliar o real comportamento da estrutura e o comportamento das ligações. Além disso, também devem ser analisadas a resistência e a rigidez das ligações e da estrutura, de modo a garantir que as intervenções não alteram o esquema estático da estrutura e cumprem as exigências normativas de cálculo.

Por vezes, atendendo ao grau de degradação da ligação torna-se impossível não alterar o comportamento original da ligação. Nestes casos, na base da escolha do tipo de reforço interessa avaliar as consequências do aumento da rigidez da ligação em termos redistribuição de esforços na estrutura, especialmente se tiver sujeita a carregamentos assimétricos, e os modos de rotura, sobretudo os frágeis.

O reforço das ligações pode ser feito de diferentes formas, sendo que a cada solução está associado um comportamento característico em termos de força, rigidez e ductilidade.

Contudo, apesar de frequentes, ainda não existe conhecimento suficiente sobre o comportamento e técnicas de reforço das ligações.

As técnicas de reforço das ligações baseiam-se na observação dos modos de rotura e na compreensão dos pontos mais fracos das ligações e permitem melhorar a geometria das ligações (Branco et al., 2015). Muitas das ligações surgiram da evolução ou reforço das ligações tradicionais primárias (dente simples deu origem a dente simples com respiga e mecha; união a meio fio com entalhe deu origem a entalhe a meia madeira com batente, etc.).

Na escolha da técnica de reforço deve-se ter conta se o pretendido é um aumento na capacidade de carga ou a introdução de novos esforços na ligação original. Além disso, deve-se ter em conta que na reabilitação de estruturas históricas, as intervenções não devem comprometer intervenções futuras e devem ser reversíveis e causar danos reduzidos ao tecido histórico da estrutura.

O método tradicional de reforço passa pela adição de madeira ou elementos metálicos (parafusos, braçadeiras, esquadros, varões, cavilhas, etc.). A aplicação destes elementos metálicos deve respeitar a distância dos ligadores aos bordos e topos da madeira e espaçamento entre ligadores. Atualmente existem mais opções de reforço para além das tradicionais, nomeadamente compósitos colados (fibras de vidro ou de carbono, malha de trama têxteis) e injeção completa com adesivo fluído, entre outras.

Tendo em conta as várias técnicas de reforço disponíveis, a escolha da técnica mais adequada passa por uma análise do tipo de ligação, da sua geometria e do tipo de rotura que ocorreu. Além disso, a concepção de um reforço eficaz deve ter em conta os seguintes aspectos:

- Comportamento da estrutura antes (estrutura original) e depois (estrutura com reforço) da intervenção;
- Compatibilidade dos materiais;
- Durabilidade e resistência à rotura do sistema de reforço;
- Visibilidade do reforço e as possíveis condições ambientais (em particular, as condições termo-higrométricas), condições químicas, fogo ou fatores físicos que podem afectar o reforço.

4.2.2.1. Reforço de ligações tradicionais com entalhes

Nas ligações tradicionais com entalhe como as forças são transmitidas por contacto direto e atrito, a existência de folgas nas superfícies em contacto do entalhe, por falta de precisão na execução do entalhe ou por retração do madeira, condiciona o funcionamento da ligação devido à redução da sua rigidez e resistência. Verifica-se que mesmo nos casos em que utilizam elementos metálicos, as folgas continuam a reduzir o desempenho da ligação (Dias et al., 2009).

As folgas podem ser corrigidas através de cunhas de madeira (Figura 77), que devem estar devidamente ligadas (pregos, parafusos) aos elementos que compõem a ligação, de modo a garantir um perfeito contacto entre os elementos, e que a concepção original da ligação não é alterada. Além disso, para garantir o funcionamento do reforço, as cunhas de madeira devem ser da mesma espécie e com um teor de água o mais próxima possível dos elementos a reforçar.

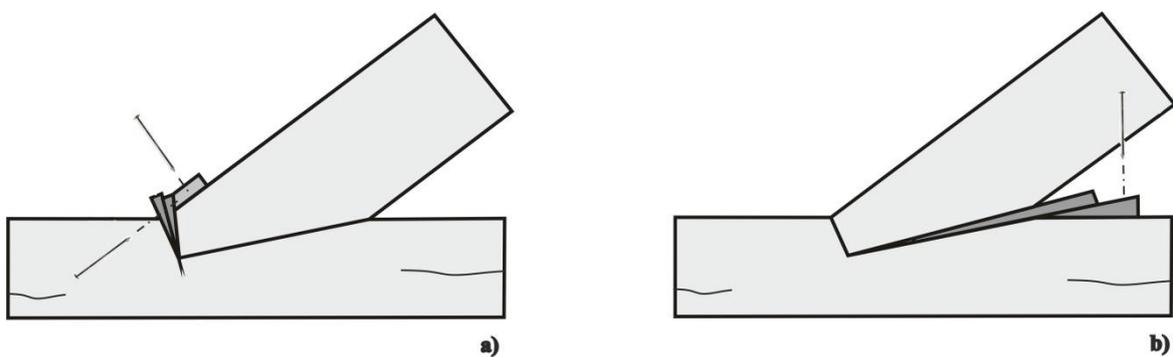


Figura 77 - Cunhas de madeira para colmatar as folgas: a) superfície frontal do entalhe; b) superfície mais longa do entalhe.

A consolidação do talão por meio de pregos ou parafusos auto-perfurantes (ver Figura 78.a)), dispostos perpendicularmente em relação ao plano de corte, é uma outra medida de reforço das ligações com entalhes, sendo que o objetivo é evitar a rotura por corte do talão. Deste modo, o esforço cortante ($F_d \cdot \cos \beta$) que atinge o talão mobiliza a resistência ao corte da madeira e dos parafusos.

É comum o uso desta técnica de reforço quando existe a necessidade de aumentar a capacidade de carga das asnas, o que implica diretamente o aumento da capacidade de carga da ligação linha- perna, dado que é a ligação sujeita a maior concentração de esforços. Assim

sendo, atendendo à impossibilidade de muitas das vezes não ser possível aumentar o comprimento do talão, recorre-se a este tipo de reforço.

Muitas das vezes, devido à deterioração do talão, é necessário recorrer a próteses de madeira, para substituir o material degradado, fixada com elementos metálicos (Figura 78.b)). No caso de se utilizarem parafusos auto-perfurantes, para obter uma maior capacidade de transporte da prótese estes devem estar inclinados (Branco et al., 2015).

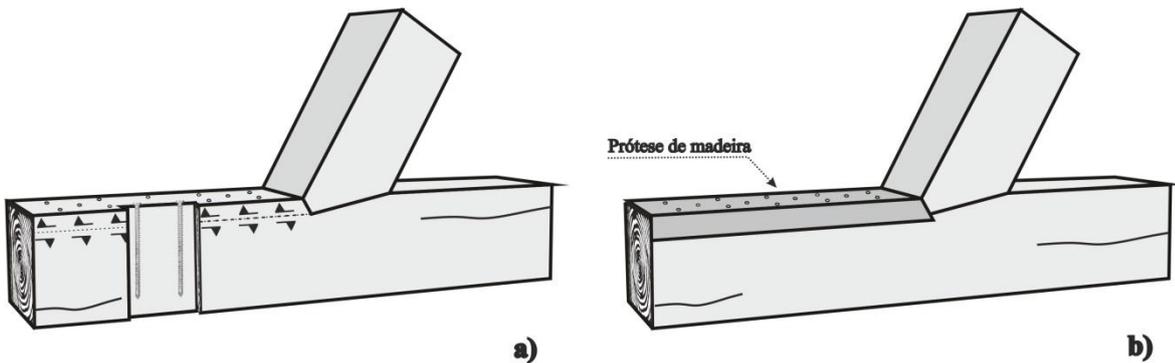


Figura 78 – Reforço de ligações com entalhe: a) parafusos auto-perfurantes; b) prótese de madeira aparafusada.

Uma outra possibilidade de reforço que permite contornar os problemas relacionados com a deterioração da linha, erros de concepção ou aumento da capacidade de carga da ligação é o uso de uma braçadeira (Figura 79). A colocação deste elemento metálico têm como objetivo acomodar os esforços e garantir a estabilidade da ligação. Esta solução permite que a intervenção se estenda a um mínimo absoluto e é uma boa alternativa nas situações em que não há possibilidade de aumentar o comprimento do talão através de empalmes de madeira.

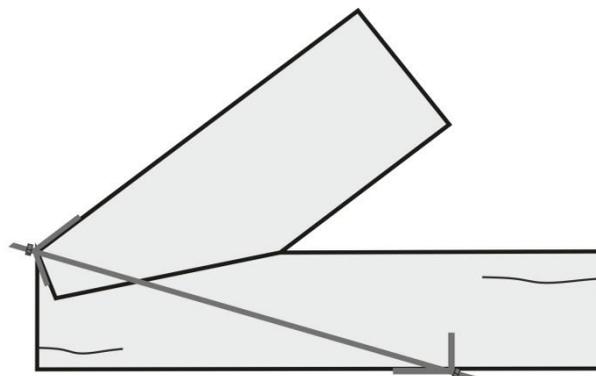


Figura 79 – Reforço de ligações com entalhes com braçadeira.

As ligações com entalhes caracterizam-se pelo seu comportamento plano. A fim de manter a funcionalidade e estabilidade da ligação sob condições adversas (problemas de conceção, descarregamento da ligação, ações cíclicas), para o qual a ligação não foi originalmente concebida, é necessário recorrer ao reforço da ligação. A solução de reforço, mais comum, passa pelo recurso a elementos metálicos que impeçam os deslocamentos relativos entre os elementos, nomeadamente esquadros, braçadeiras, varões, etc.

Nos últimos anos, vários têm sido os testes monotónicos e cíclicos, com ou sem reforço, das ligações com dente simples, com vista ao estudo do seu comportamento, identificação e avaliação do reforço, com recurso a elementos metálicos, mais adequado.

As ligações com dente simples, mesmo sem qualquer sistema de reforço, apresentam uma significativa rigidez rotacional, que é dada em função do nível de compressão do elemento de madeira e do ângulo de inclinação (Parisi et al., 2000; Parisi et al., 2002; Branco et al., 2006b). Contudo, o ângulo de atrito (Branco et al., 2011; Parisi et al., 2000), a altura do elemento de madeira (Branco et al., 2005) e o teor de humidade (Branco et al., 2005) são também parâmetros condicionantes para o comportamento semi-rígido da ligação.

Contudo, estas ligações sem qualquer dispositivo de reforço, apresentam uma capacidade de dissipar energia muito limitada (Parisi et al., 2008). Sob efeito de ações cíclicas, o reforço revela-se a única forma de garantir o contacto entre os elementos contíguos.

O recurso a elementos metálicos como elementos de reforço, tem sido alvo de estudo ao longo dos últimos anos. A avaliação mais recente (Branco, 2012) de quatro soluções de reforço (esquadro, varão, braçadeira rígida e braçadeira) (ver Figura 80), baseadas em técnicas tradicionais, revela que todas as técnicas analisadas resultam num aumento substancial do coeficiente equivalente de amortecimento viscoso (V_{eq}), da capacidade resistente e rigidez. Contudo, a vantagem mais importante das soluções de reforço, quando comparadas com as não reforçadas, é o ganho ductilidade.

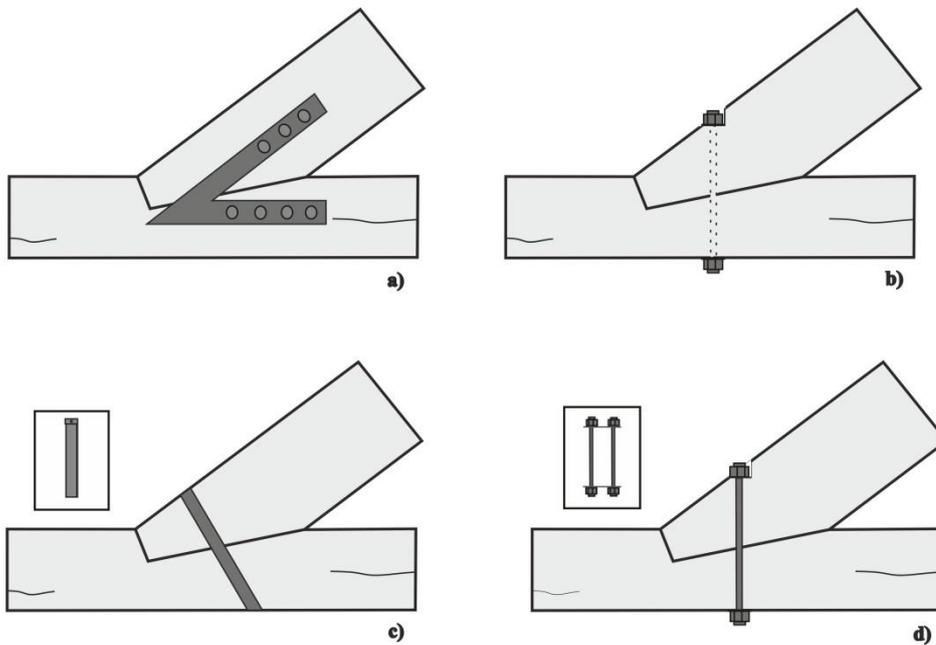


Figura 80 - Soluções de reforço: a) esquadro; b) varão interno; c) braçadeira rígida; d) braçadeira.

Conclui-se que todas as soluções de reforço estudadas são eficientes (ver Figura 81). A solução menos eficiente na direção positiva de carregamento, em termos de capacidade resistente, é a braçadeira. Por sua vez, na direção negativa, a solução menos eficiente é a braçadeira rígida em termos de capacidade de deformação e resistência.

Actualmente o uso da braçadeira rígida está em desuso, embora tenha sido frequentemente utilizado nas construções das coberturas do século XIX (Branco et al., 2006b).

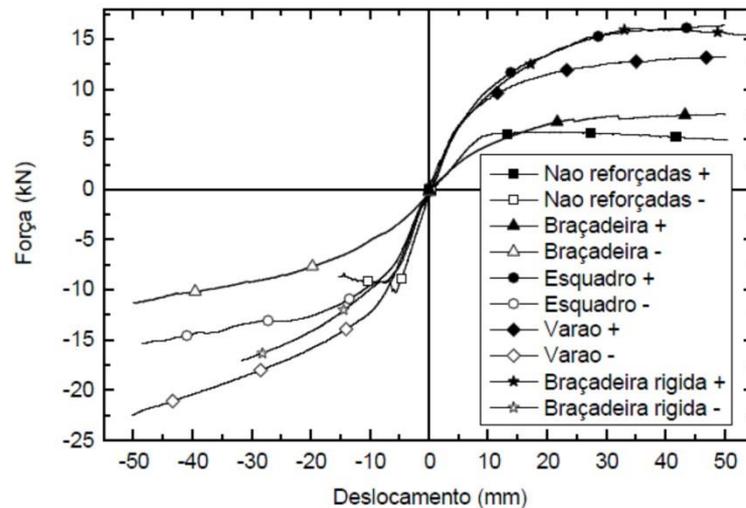


Figura 81 – Curvas médias de força-deslocamento de ligações não reforçadas e reforçadas, obtidas a partir de ensaios monotônicos ($\sigma_c = 30\text{MPa}$) (Branco, 2012).

Outros ensaios têm sido realizados, com o objetivo de avaliar diferentes formas de utilizar alguns dos reforços que têm sido estudados, nomeadamente a utilização de dois varões de menor diâmetro (Branco et al., 2005; Parisi et al., 2008) em vez de um de maior diâmetro (Figura 82). O objetivo desta solução consistia em melhorar a distribuição dos esforços e reduzir a deformação plástica (Parisi, et al., 2008). Contudo, verificou-se que dependendo da posição dos varões, os resultados eram distintos. No caso dos varões alinhados transversalmente em relação à ligação, verificou-se um elevado número de ciclos muito estáveis, pelo contrário, parafusos dispostos ao longo do eixo do elemento de madeira, a ligação tornou-se demasiado rígida e atingiu rotura frágil antes desenvolvimento de uma resposta cíclica (Parisi, et al., 2008).

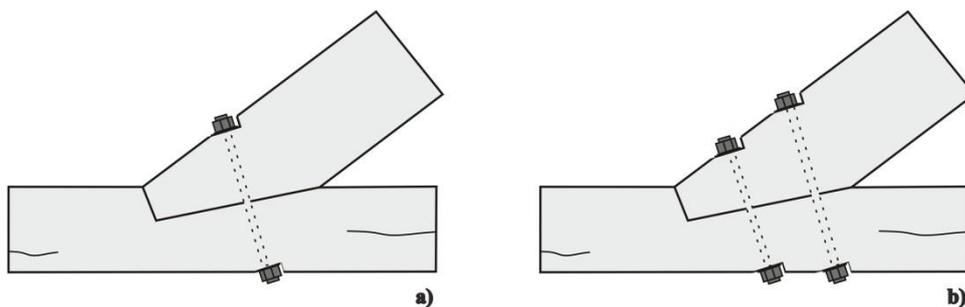


Figura 82 – Reforço de ligações com entalhes com recurso a: a) varão interno; b) dois varões internos.

A adição de elementos metálicos é o método mecânico de reforço mais comum. Contudo, actualmente, o reforço das ligações com materiais compósitos (FRP) constitui uma solução inovadora (Branco et al., 2008).

Ensaio cíclicos em ligações tradicionais de madeira de dente simples reforçadas com mantas de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono) (Figura 83), revelaram benefícios importantes na aplicação deste tipo de reforço eficientes no comportamento da ligação, nomeadamente pelo aumento da capacidade de dissipar energia e melhoria da ductilidade e resistência (Branco et al., 2008).

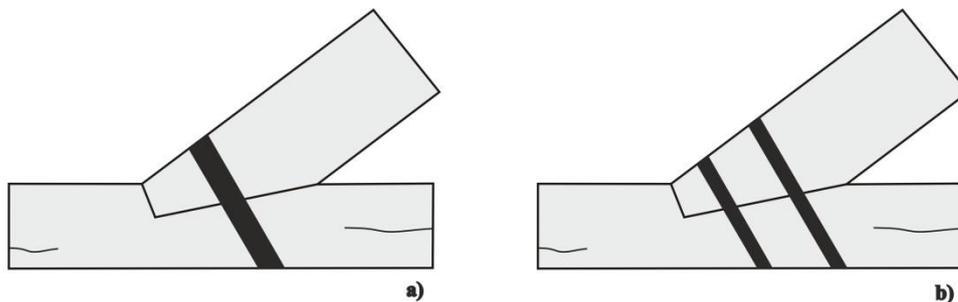


Figura 83 – Ligação com ângulo de abertura de 30° reforçada com: a) uma manta de CFRP de 10 cm; b) duas mantas de CFRP de 5 cm.

De entre as duas soluções de reforço analisadas, a que apresenta um melhor comportamento global, em termos de ductilidade e capacidade resistente, é a solução com duas mantas de 5 cm de CFRP (Branco et al., 2008).

As fibras de carbono são utilizadas quando se pretende um aumento de rigidez e resistência da ligação, por sua vez as fibras de vidro usam-se quando o objetivo é o aumento de ductilidade. No entanto, os compósitos de fibras de vidro são os que mais se utilizam no reforço de estruturas de madeira, face ao baixo custo (quando comparado com as de carbono) e valores de propriedades mecânicas mais semelhantes aos da madeira.

Contudo, apesar das vantagens do uso de material compósito como solução de reforço, em termos de ganhos de resistência e ductilidade das ligações, existem um conjunto de desvantagens que limita a sua aplicação, nomeadamente o facto de ser uma técnica irreversível e muito intrusiva, de custo elevado e que necessita de mão-de-obra especializada. Além disso, o facto de haver um aumento da rigidez e não haver regulamentação específica que avalie a influência desta técnica de reforço na alteração do comportamento da ligação leva a que o uso de FRPs como solução de reforço seja limitado.

Uma outra solução de reforço, apesar de menos frequente, é o método adesivo (Figura 84). Esta técnica de reforço consiste na inserção de elementos de reforço em aço inoxidável (varões ou chapas) ou fibras, normalmente de vidro, em negativos realizados na ligação, posicionados em lugares específicos, que serão posteriormente selados com resina epoxídica e uma tira de madeira. Os elementos são inseridos paralelamente à direção das fibras, dado que é a direção na qual a madeira sofre insignificantes movimentos dimensionais (LegnoDOC), e assegura uma excelente resistência da ligação ao longo do tempo.

Quando a madeira se encontra deteriorada, procede-se à substituição da parte deteriorada por um novo elemento de madeira (ou por resina epoxídica), que se encontra ligado à parte sã através de varões de aço ou material compósito, e o negativo de contacto é preenchido com resina e coberto por uma tira de madeira com uma espessura adequada. Neste caso, para que o impacto da intervenção seja o mínimo possível, é importante saber onde termina a área degradada.

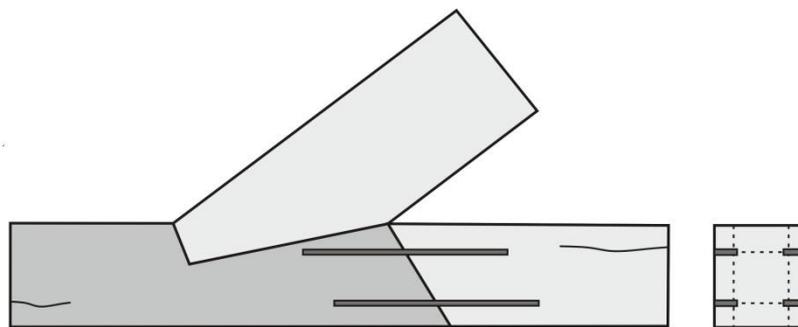


Figura 84 – Método adesivo: inserção de elementos de reforço.

Esta solução, mecanicamente eficaz, permite a consolidação de ligações danificadas ou fissuradas e o reforço de ligações com reduzida rigidez face aos esforços a que está sujeita (Branco, 2014; Pinto, 2008). No entanto, a alteração do comportamento da ligação, a irreversibilidade e a necessidade de mão-de-obra especializada faz com que esta técnica tenha caído em desuso.

A aplicação de gussets (chapas de aço ou de contraplacado estrutural) constitui uma técnica que, embora frequente, deve ser evitada, uma vez que se verifica uma excessiva rigidificação da ligação, que inicialmente possui um comportamento semi-rígido, alterando o mecanismo de distribuição de tensões entre os elementos ligados (ver Figura 85). Além disso, os gussets impedem a inspeção da ligação e no caso de ataque por agentes biológicos pode ser tardiamente detetado.

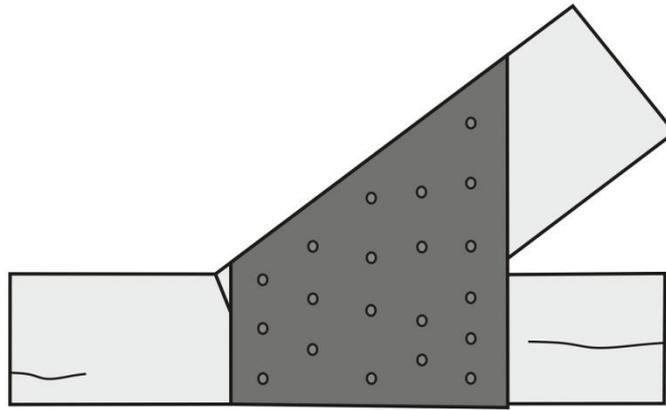


Figura 85 – Reforço com aplicação de gussets.

4.2.2.1.1. Reforço de ligações com respiga e mecha

O principal problema das ligações com respiga e mecha está associado à falha prematura quando ocorrem grandes deslocamentos (Parisi et al., 2000). Este comportamento deve-se ao facto de esta ligação possuir uma rigidez muito baixa. Contudo, este tipo de ligações apresenta um comportamento força-deslocamento, geralmente, muito dúctil (Feio, 2008).

Ensaio realizados por Shanks e Walker (2005) indicaram que o encaixe entre a respiga e a mecha desempenham um papel muito importante na capacidade de carga e rigidez da ligação. Quando a ligação está submetida ao corte, o comportamento da respiga no interior da mecha tem influência na rigidez da ligação.

Em ligações submetidas à tração, a carga é transferida, principalmente, pelos pinos de madeira (Shanks et al., 2005; Jankowski et al., 2005) (Figura 86).

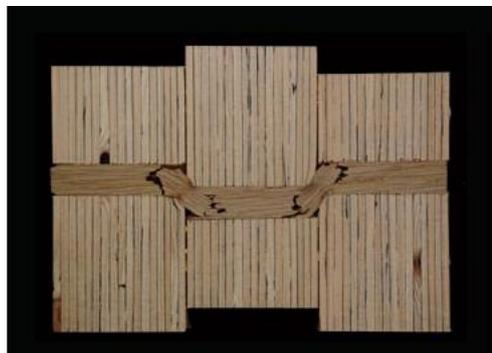


Figura 86 - Modo de falha com pino de madeira (Harris et al., 2014).

Por sua vez, nas ligações de respiga e mecha sujeitas à compressão, os esforços são transferidos por tensão nas zonas de contacto e traduz-se por deformações nos cantos e bordas laterais da respiga. A respiga e a mecha são responsáveis por sustentar deslocamentos consideráveis. Na presença de cavilha, ocorrem amolgadelas na espiga junto à cavilha, e em seguida, o truncamento da parte de espiga entre furo da espiga e extremidade traseira (Jankowski et al., 2005) (Figura 87).

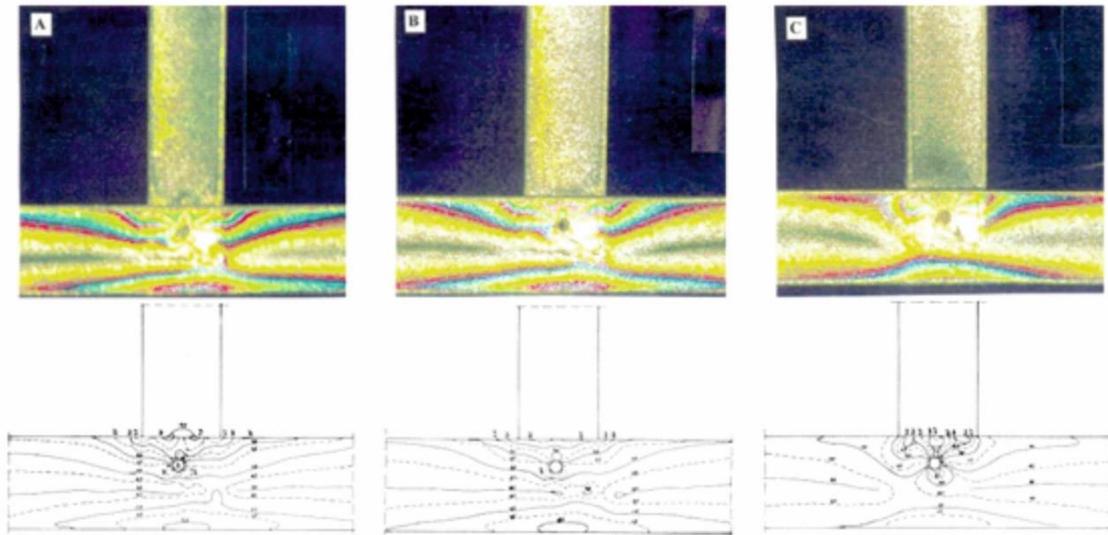


Figura 87 - Teste de foto-elasticidade de uma ligação respiga e mecha: a) pino de madeira; b) pino de aço; c) sem pino (Jankowski et al., 2005).

Uma técnica de reforço tradicional, caso seja necessário substituir o elemento, consiste em adicionar uma cavilha de encaixe ao conjunto de modo a aumentar a força em tração (ver Figura 88) (Branco et al., 2015). Outro motivo para a sua aplicação acontece quando, por retração da respiga, as superfícies do entalhe deixam de estar em contacto, a cavilha de encaixe ajuda a restabelece o contacto.

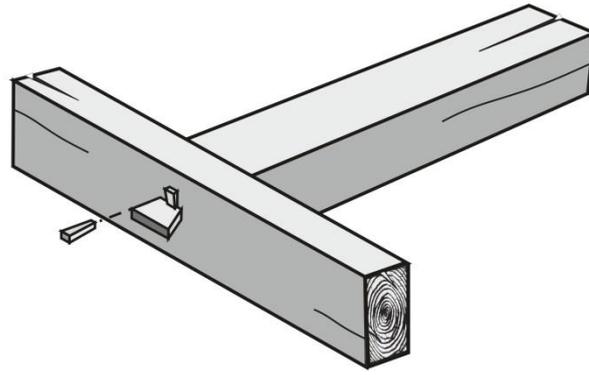


Figura 88 – Adição de uma cavilha de encaixe na ligação.

Branco et al. (2015) sugere, que no caso de os elementos continuarem em serviço, seja introduzida uma braçadeira a contornar a ligação (Figura 89), a fim de absorver parte dos esforços de tração. Para garantir o bom funcionamento do reforço, e evitar a formação de fendas, é necessário fixar a braçadeira com parafusos na extremidade do elemento de suporte.

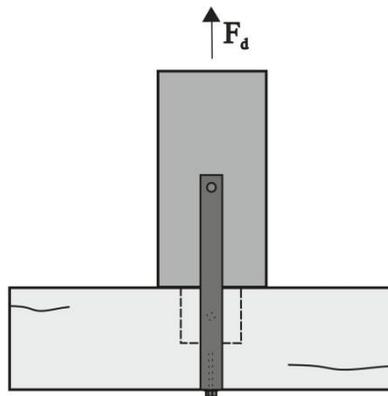


Figura 89 – Reforço de uma ligação de respiga e mecha com recurso a braçadeira.

O cabo de aço (ver Figura 90) é uma solução de reforço usada para evitar forças de tração no elemento, em consequência de problemas de serviço da ligação (p.e. pinos quebrados).

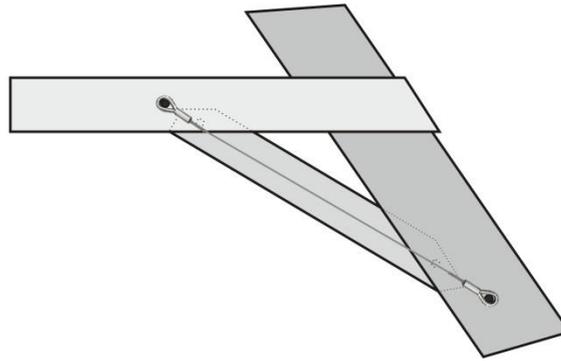


Figura 90 - Reforço de uma ligação de respiga e mecha com recurso a cabos de aço (Branco et al., 2015).

O reforço das ligações passa pelo aumento da capacidade de carga e capacidade dissipativa. Numa ligação respiga e mecha entre viga-pilar, que se pretenda o aumento da capacidade dissipativa, Branco et al. (2008) aconselha a interposição de várias camadas de laminado FRP (Figura 91).

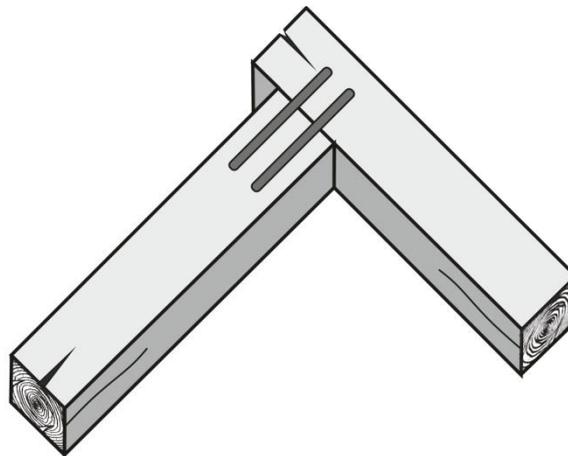


Figura 91 – Reforço por interposição de várias camadas de laminado de FRP.

4.2.2.1.2. Reforço de ligações de dente simples com respiga e mecha

A ligação de dente simples com respiga e mecha, tal como foi dito anteriormente, é utilizada a fim de garantir uma perfeita conexão entre elementos e prevenir deslocamentos laterais para fora do plano da ligação.

O facto de não haver recomendações geométricas relativamente à profundidade e comprimento da respiga, de modo a evitar falhas estruturais das ligações, faz com que alguns testes tenham sido realizados para avaliar o comportamento deste tipo de ligações.

Palma et al. (2007) realizou testes monotónicos (abrindo e fechando a inclinação ângulo) em ligações de dente simples com respiga e mecha, submetidas à compressão, a fim de prever o seu comportamento. A ligação foi montada inicialmente para um teor de água de 12 % e atingiu 20% de teor em água.

Os resultados dos testes (Figura 92) mostraram, para um teor em água de 20%, após o ajuste entre os elementos, a resistência e o comportamento dúctil aumentam. Além disso, a respiga e a mecha melhora a ductilidade das ligações ao fechar o ângulo de inclinação.

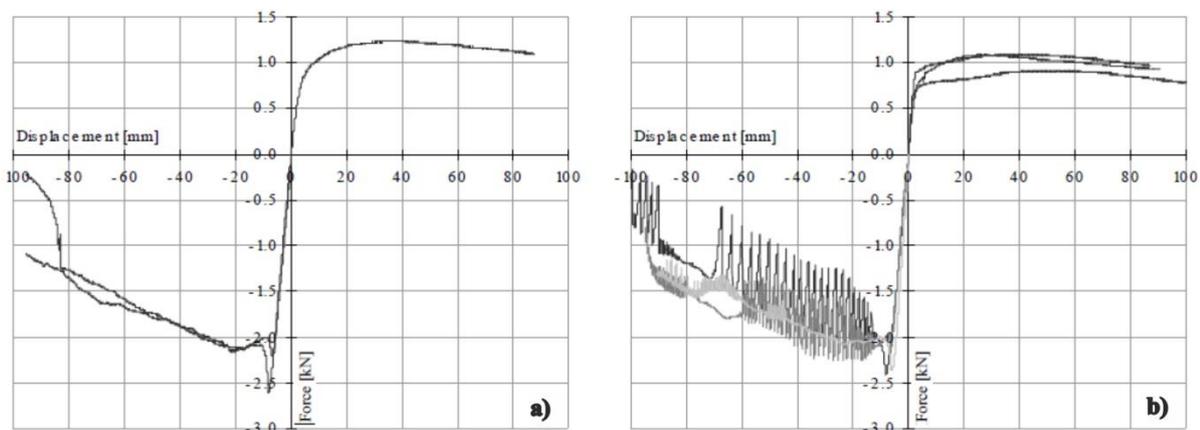


Figura 92 - Comparação entre testes de dente simples e dente simples com respiga e mechas com teor em água de: a) 12%; b) 20% (Palma et al., 2007).

Num dos ensaios, ocorreu a falha da respiga ao fechar o ângulo de inclinação e traduziu-se por uma diminuição significativa da ductilidade da ligação (Figura 93).



Figura 93 - Falha da respiga ao fechar o ângulo de inclinação (Palma, et al., 2007).

Feio et al. (Feio et al., 2008; Feio et al., 2014) realizou testes de ligações de dente simples com respiga e mecha, submetidas à compressão, a fim de verificar a capacidade resistente da ligação e avaliar a deformação e respectivos modos de falha. Os modos de falha padrão encontram-se representados na Figura 94.



Figura 94 - Padrões de falha da ligação de dente simples com respiga e mecha são: a) colapso da ligação por compressão, com distribuição uniforme dos danos ao longo do comprimento de contacto (Feio et al., 2008; Feio et al., 2014); b) colapso da ligação por compressão, com saliência para fora do plano (Feio et al., 2014); c) falha combinada em compressão e corte paralelo às fibras na respiga (Feio et al., 2014).

Sem qualquer tipo de reforço, a falha mais comum neste tipo de ligação ocorre essencialmente por compressão da madeira perpendicularmente à ligação.

A técnica de reforço aplicada a este tipo de falhas deve melhorar a distribuição dos esforços e reduzir a deformação plástica da ligação. O reforço mais adequado passa pela adição de elementos metálicos à ligação, abordados anteriormente, sendo que deve ser avaliado e ponderado as consequências de cada sistema de reforço.

As ligações de dente simples com respiga e mecha, tal como todas as ligações tradicionais que funcionam por contacto, exigem enorme rigor na sua concepção e execução, dado que a existência de folgas reduz a resistência original à sua concepção. O ajustamento da ligação, na presença de folgas, pode ser realizado através de calços de madeira.

4.2.2.2. Reforço de cruzamentos

Os cruzamentos de sobreposição completa possuem uma eficiência muito reduzida, dado que apenas o pino oferece resistência. Na presença de grandes esforços de tração, por exemplo ventos fortes, o conjunto acaba por se desintegrar (Jasienko et al., 2014).

Os pinos de madeira ou ligadores metálicos, quando adicionados às ligações, permitem não só a transferência das forças de tração e corte, como também garantem que os elementos estejam na sua posição. Além disso, também aumentam a capacidade de carga das ligações.

Tendo em conta os testes realizados Jankowski et al. (2005) verifica-se que dependendo do tipo de carga aplicada, as ligações de cauda de andorinha comportam-se de maneira diferente, isto é, diferentes partes da ligação são solicitadas (Figura 95). O mesmo se aplica em todos os tipos de cruzamentos, sendo que as solicitações definem os modos de rotura que podem ocorrer.

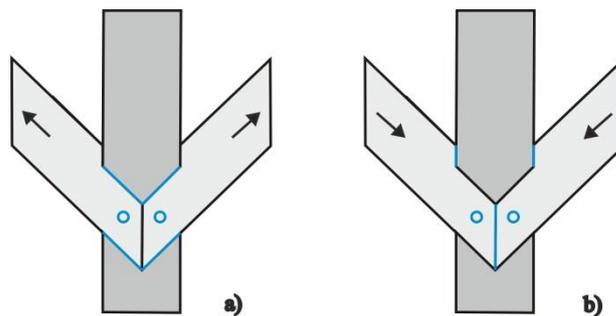


Figura 95 – Identificação das zonas transportadoras de carga de uma ligação sujeitas a esforços de: a) tração; b) compressão.

Poletti et al. (2014) realizou dois tipos de testes de ligações a meio fio de ponta (Figura 96 e 97): testes cíclicos pull-out e testes cíclicos estáticos no plano. Posteriormente, as ligações foram reforçadas com parafusos auto-perfurantes (realizado apenas para testes cíclicos pull-out), chapas metálicas e mantas de GFRP.

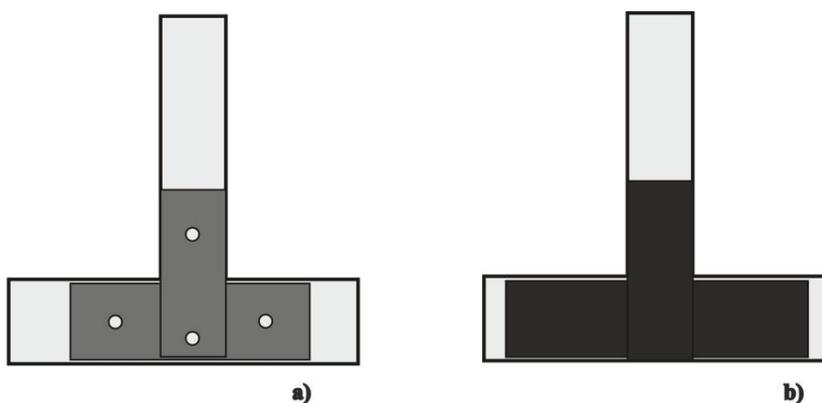


Figura 96 - Ligação reforçadas com: a) chapas metálicas; b) mantas de GFRP.

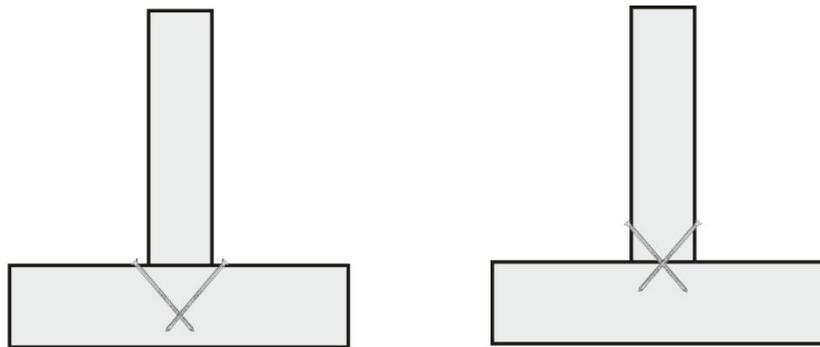


Figura 97 - Ligação reforçadas com parafusos auto-perfurantes.

Os resultados dos testes cíclicos pull-out com reforço (Figura 98) mostraram que a rigidez inicial e a capacidade de dissipar energia da ligação aumentam. Contudo, o reforço com mantas de GFRP levou a uma rotura frágil.

No que diz respeito as mantas de GFRP uni-axiais, estas acabam por descolar e sofrem rotura precoce, pelo que não são adequadas para resistirem a sollicitações ao corte.

As ligações à qual foram adicionadas próteses de madeira e elementos de reforço, mostraram-se inadequadas e possuem um comportamento débil face à ligação real.

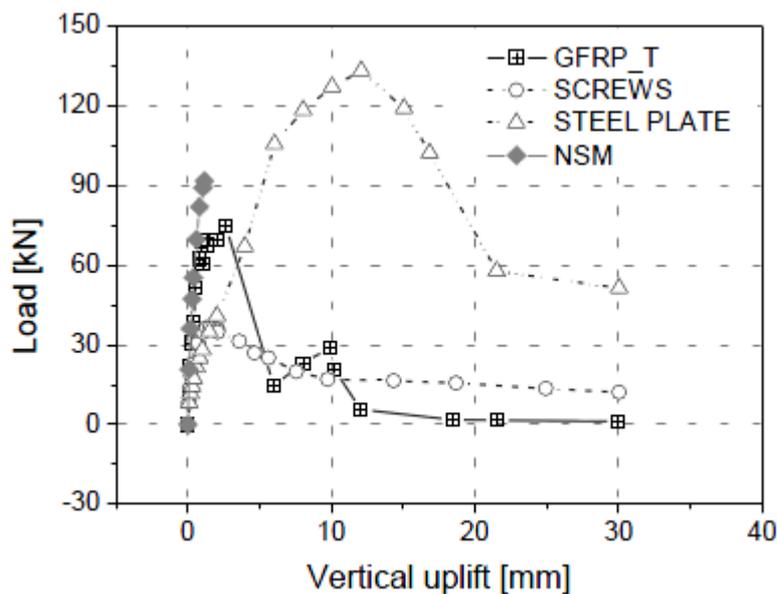


Figura 98 – Resultados força- deslocamento de ligações reforçadas (Poletti et al., 2014).

Os cruzamentos resultam do enfraquecimento de ambos elementos que constituem a ligação, pelo que deve-se garantir o perfeito encaixe dos elementos. Contudo, devido a fenómenos de retração ou falta de precisão, as superfícies deixam de estar em contacto e é necessário

proceder ao seu reforço. Uma técnica tradicional de reforço é a colocação de cunhas de madeira, a fim de restabelecer a capacidade de carga da ligação para a qual foi concebida.

Para ajustar e aumentar a rigidez da ligação é possível executar na superfície do entalhe um (ou dois) dente (Figura 99). Contudo, deve-se ter em atenção que ao diminuir a superfície do entalhe diminui também a capacidade de carga.

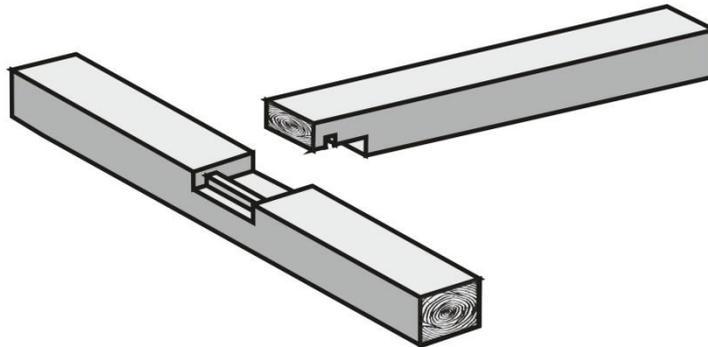


Figura 99 – Adição de um dente na superfície de entalhe da ligação a meio fio de ponta.

Um modo de rotura, muito frequente, é a formação de uma superfície de corte em um dos elementos da ligação. Neste caso, opta-se por reforçar a ligação com recurso a parafusos totalmente auto-perfurantes (Figura 100). Trata-se de uma solução eficiente que aumenta a rigidez e gera um modo de falha mais dúctil. Os parafusos devem estar dispostos perpendicularmente em relação à direção das fibras e inclinados para aumentar a capacidade de carga da ligação reforçada (Branco et al., 2015).

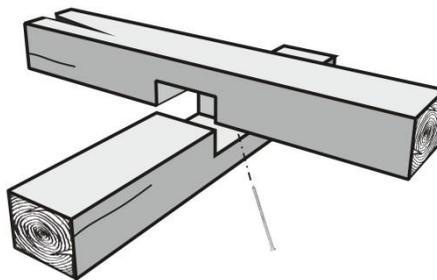


Figura 100 – Reforço ao corte com parafusos totalmente auto-perfurantes.

Nas ligações com cauda de andorinha, quando submetidas à tração, pode ocorrer a divisão da madeira na zona do entalhe. Para restabelecer a capacidade de carga da ligação, é possível utilizar chapas metálicas, braçadeira ou ligadores metálicos.

As chapas metálicas, no reforço ao corte, devem estar dispostas de ambos os lados da ligação, para suspender a parte inferior da ligação à parte superior e vice-versa. Por sua vez, tal como foi referido nas ligações de respiga e mecha, a braçadeira deve contornar a ligação. Quando se opta pela adição de ligadores (cavilhas, parafusos auto-perfurantes, etc.) estes devem ser colocados ao nível do entalhe, o que aumenta a rigidez da ligação, contudo também permite absorver os esforços de tração e restabelece o mecanismo de corte fornecido pelo pino.

4.2.2.3. Reforço de empalmes

Os empalmes correspondem a emendas longitudinais de elementos e possuem uma reduzida resistência à flexão (Hirst et al., 2008). Este tipo de ligação deve ser localizado em zonas onde os esforços atuantes são baixos, em particular os esforços à flexão, a fim de minimizar a deformação e possível rotura.

De entre os vários tipos de empalmes, as ligações cortadas com ângulos retos são as menos adequadas quando solicitadas à flexão (Branco, et al., 2015).

Hirst et al. (2008) realizou testes de flexão pura vertical e flexão pura lateral sobre quatro tipos de empalmes reforçados (Figura 101). Os ensaios reportaram que todas as juntas exibiam ductilidade considerável quando carregadas e perto da rotura.

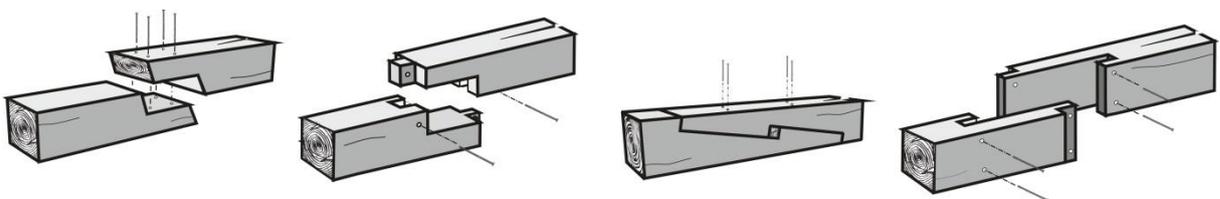


Figura 101 – Empalmes reforçados.

Embora os pinos sejam elementos críticos da ligação, sob os quais pode ocorrer corte se a sua qualidade não for garantida, o modo de falha que se verificou nas amostras foi a pré-fissuração da madeira. Hirst et al. (2008) frisou também a importância do comprimento de sobreposição para fornecer melhor desempenho da ligação.

Desde os tempos antigos que os pinos de madeira eram utilizados para reforçar os empalmes (Branco et al., 2015). Hoje em dia é comum recorrer-se a ligadores metálicos (parafusos, parafusos auto-perfurantes, etc.) (ver Figura 102). Contudo, quando as cargas são elevadas

opta-se por colocar nas laterais da ligação placas de metal ou de madeira, a fim de aumentar a sua rigidez e resistência, que sem estes elementos é baixa. Esta técnica de reforço é adequada e pouco intrusiva, mas no caso de se optar pelo uso de elementos de madeira, estes devem possuir características semelhantes à ligação original.

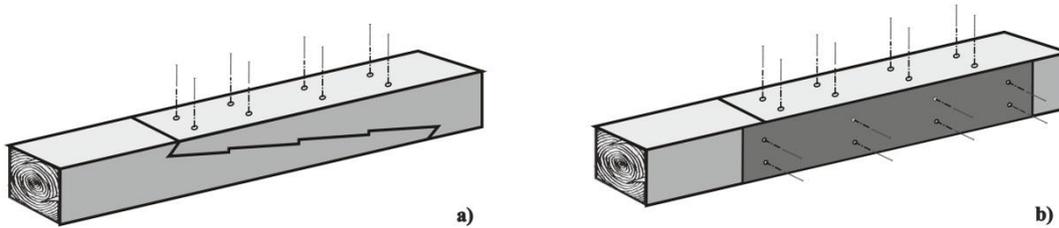


Figura 102 – Reforço de empalmes: a) parafusos auto-perfurantes; b) placas de metal.

A cintagem (Figura 103) é um outro método de reforço e envolve a adição de tiras metálicas na zona da ligação, para garantir o aumento de rigidez e melhorar o comportamento da ligação.

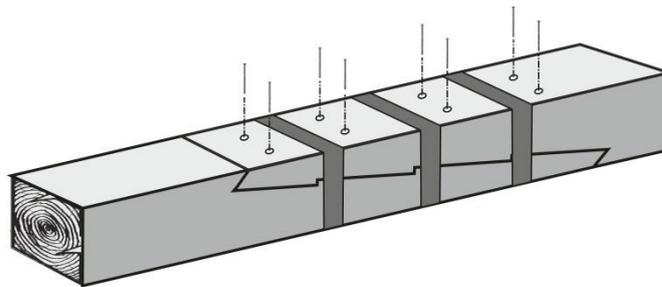


Figura 103 – Empalmes reforçados por cintagem.

Tal como foi referido acima, os empalmes possuem uma reduzida resistência à flexão, e quando sujeitos a esforços elevados pode ocorrer pré-fissuras na madeira. Nesta situação, uma forma de consolidar a ligação é adição de parafusos auto-perfurantes.

Uma outra técnica tradicional de reforço, se os elementos da ligação não corresponderem perfeitamente à área do entalhe, é a colocação de cunhas de madeira, a fim de restabelecer a capacidade de carga da ligação para a qual foi concebida.

Os empalmes podem ser reforçados com recurso a técnicas mais inovadoras que envolvem a aplicação de materiais compósitos ou varões de aço. Ambos os topos dos elementos a ligar, segundo a direção longitudinal da ligação, são perfurados e é inserido no negativo cavilhas de FRP pultrudidas (ou varões de aço), posteriormente preenchidos com resina e, normalmente, coberto por uma tira de madeira com uma espessura adequada. Esta técnica de reforço é usada em casos de deterioração localizada, necessidade de aumento da capacidade de carga

(evitando o aumento da secção transversal) ou necessidade de melhorar as condições de segurança. No entanto, exige mão-de-obra especializada e um plano de qualidade adequado, para que seja garantida a eficácia da intervenção (Cruz et al., 2004).

A ligação pode ser complementada com a aplicação, transversalmente em relação aos elementos ligados, de cavilhas secundárias, para melhorar o desempenho da ligação na direcção perpendicular às fibras (Cruz, et al., 2000).

Capítulo 5

REGRAS PARA REFORÇO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA

A avaliação da segurança das estruturas de madeira existentes passa por uma avaliação das propriedades mecânicas dos elementos e ligações e, quando necessário, das técnicas a implementar (grau de compatibilidade e eficiência). As técnicas adotadas no reforço das ligações têm como principais objetivos melhorar o seu comportamento ao nível da resistência e ductilidade.

Embora já existam alguns resultados científicos sobre o reforço de ligações tradicionais de madeira, existe uma clara falta de informação sobre regras de conceção e dimensionamento.

A escolha do tipo de intervenção envolve um estudo das diferentes soluções de reforço que melhor se adequam ao problema em causa. E consiste numa análise do tipo de materiais e respectivas propriedades, necessários ao reforço e ao seu dimensionamento. Atendendo ao grau de intervenção necessário e à necessidade de rigidificação da ligação, opta-se pela solução mais adequada.

É comum o uso de ligadores tipo cavilha (pregos, parafusos, parafusos de porca e cavilha) como solução de reforço das ligações tradicionais de madeira. As forças da ligação são transmitidas aos ligadores essencialmente por corte. E a verificação da segurança deste tipo de

ligadores baseia-se na conhecida teoria de Johansen, que tem em conta o tipo de ligação: ligação madeira-madeira em corte simples ou duplo; ligação aço-madeira, em corte simples ou duplo, com chapas finas ou espessas. Quando se utilizam múltiplos ligadores é necessário determinar a resistência global do conjunto de ligadores que constituem a ligação, dado que a resistência de vários ligadores é inferior à soma das resistências individuais de cada um (Dias et al., 2009).

Embora os ligadores metálicos sejam muito utilizados como solução de reforço, existem outros tipos de elementos de reforço igualmente eficazes. Contudo, a verificação da segurança envolve uma análise do tipo de sollicitação a que os elementos que constituem o reforço ficam sujeitos. Sendo, necessário verificar que a resistência dos elementos que a constituem o reforço é superior à carga atuante.

5.1. Ligações tradicionais com entalhes

Na técnica de reforço do talão por adição de uma prótese de madeira ligada à madeira existente por meio de pregos ou parafusos auto-perfurantes, são os ligadores metálicos que resistem ao esforço de corte que atinge o talão (ver Figura 104). E para repartir a componente horizontal da força axial, são necessários múltiplos ligadores.

A capacidade de carga global da ligação corresponde à soma da capacidade de carga das n fiadas de ligadores que compõem a ligação. Logo, o número de ligadores que devem compor o reforço é dado por:

$$n_{ef} \geq \frac{F_d \cdot \cos \beta}{R_{V,d}} \quad (67)$$

Onde F_d é a força de compressão, β é o ângulo formado entre as linhas centrais dos elementos que constituem a ligação, $R_{V,d}$ é o valor de cálculo da capacidade resistente de cada ligador paralela ao fio e n_{ef} é o número efectivo de ligadores numa fiada paralela ao fio (os valores de n_{ef} , para fiadas de ligadores paralelas ao fio, são indicados no EC5: 8.3.1.1(8) ou 8.5.1.1(4)).

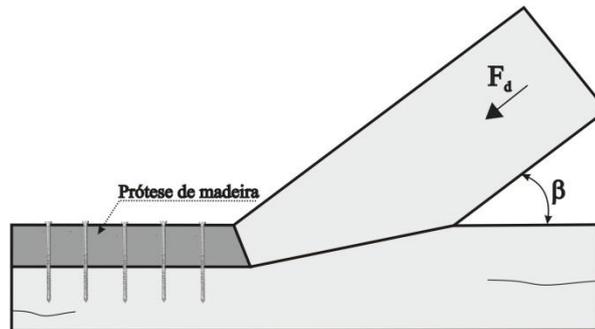


Figura 104 – Reforço ao corte de uma ligação com dente simples.

Como se trata de uma ligação com múltiplos ligadores, é necessário garantir espaçamentos mínimos entre ligadores e entre ligadores e faces extremas do elemento de madeira (EC5: 8.3.1.2(5) ou 8.5.1.1(3)), de modo a evitar concentração de tensões, resultantes de cada ligador, e rotura tipicamente frágil.

Na situação em que é apenas necessário consolidar o talão, é mobilizada a resistência ao corte dos ligadores e da madeira.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} + F_{V,d} \geq F_d \cdot \cos \beta \quad (68)$$

Onde $F_{V,d}$ é o valor de cálculo da tensão resistente de corte do elemento de madeira.

Na concepção do reforço é possível optar por um maior número de ligadores com menor diâmetro ou um menor número de ligadores com maiores diâmetros (cavilhas, parafusos de porca). Os ligadores de menor diâmetro têm modos de rotura mais dúctil, contudo ligadores com maior diâmetro apresentam menor capacidade de deformação plástica mas permitem soluções com capacidade de carga mais elevadas (Dias et al., 2009).

Na solução de reforço que envolve o uso de uma braçadeira para absorver toda a componente horizontal da força axial de compressão, os dois cabos de aço que compõem a braçadeira encontram-se traccionados (ver Figura 105). E a componente horizontal do esforço de tração dos cabos tem de ser superior à componente horizontal da força axial de compressão.

$$F_{t,Rd} \cdot \cos \alpha \geq F_d \cdot \cos \beta \quad (69)$$

Onde $F_{t,Rd}$ é o valor de cálculo da tensão resistente de tração do cabo de aço e α é o ângulo formado entre a base da linha e o cabo de aço.

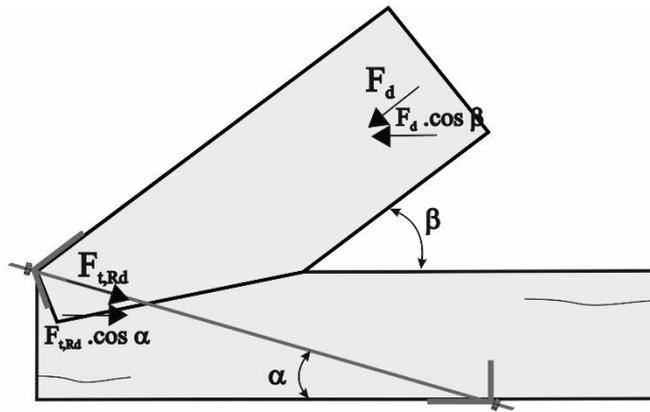


Figura 105 – Mecanismo de distribuição das forças num sistema de reforço com recurso a cabos de aço.

Quando se recorre a elementos metálicos (varão, braçadeira, esquadros) para reforçar as ligações de dente simples é necessário proceder ao seu dimensionamento tendo em conta o esforço axial atuante. De acordo com o EC5 (EN 1995-1-1, 2010), a determinação do valor da capacidade resistente das ligações com recurso a ligadores metálicos do tipo cavilha deve ter em conta a resistência ao arranque do ligador, a resistência ao esmagamento localizado e as contribuições da tensão de cedência.

O varão corresponde a um parafuso interior, colocado no eixo da perna, de forma a absorver os momentos que aí se desenvolvem (Branco et al., 2006), perpendicularmente a um dos elementos, e liga a perna e a linha. A capacidade resistente do parafuso, sujeito a corte simples, deve ser superior à força axial de compressão.

$$R_{V,d} \geq F_d \quad (70)$$

Onde $R_{V,d}$ é o valor de cálculo da capacidade resistente de parafusos, por plano de corte e por ligador, e deve ser considerado igual ao valor mínimo obtido a partir da equação (8.6) do EC5 (EN 1995-1-1, 2010).

O esquadro é formado por duas chapas metálicas, soldadas entre si em forma de V, paralelas aos elementos de madeira e aparafusadas à madeira (ver Figura 106). Na verificação da segurança da ligação, como se trata de uma ligação aço-madeira, o valor de cálculo da capacidade resistente da ligação depende da espessura das chapas de aço. E deve-se garantir que capacidade resistente dos parafusos, sujeitos a corte duplo, mais a capacidade resistente da madeira deve ser superior à força axial de compressão.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} + f_{c,\alpha,d} \geq F_d \quad (71)$$

Onde $f_{c,\alpha,d}$ é a resistência à compressão num determinado ângulo (α) formado com as fibras, definida pelo EC5: 6.2.2 (2) e $R_{V,d}$ é o valor de cálculo da capacidade resistente de parafusos por plano de corte e por ligador (EC5: 8.2.3(3)).

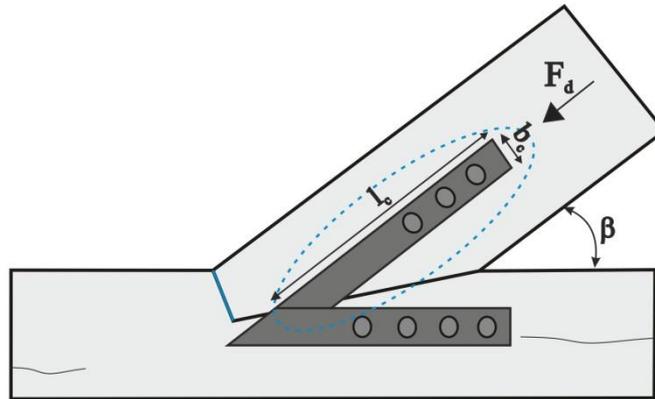


Figura 106 – A capacidade resistente do reforço das cavilhas afixadas na chapa paralela à perna mais capacidade resistente da madeira deve ser superior à força axial de compressão.

Também é necessário garantir que a chapa metálica tem resistência suficiente (EC5: 8.2.3 (2)), isto é:

$$\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot l_c} \geq f_y \quad (72)$$

Onde f_y é o valor da tensão de cedência da chapa, b_c é a largura da chapa e l_c é o comprimento da chapa.

Para um correto funcionamento da ligação é necessário garantir que são respeitados os afastamentos mínimos entre ligadores e entre ligadores e bordos da chapa metálica. O afastamento dos ligadores na chapa é influenciado pelo tipo de ligador e pelo tipo de esforço em causa.

A chapa metálica paralela à linha tem, normalmente, a mesma dimensão da chapa paralela à perna. O número de ligadores também é o mesmo, ou caso seja garantido o afastamento podem ser adicionar mais ligadores.

5.2. Ligações com respiga e mecha

Nas ligações com respiga e mecha uma das soluções de reforço passa pelo uso de uma braçadeira em forma de U, a contornar a ligação, e fixa à madeira através de ligadores colocados na extremidade da braçadeira (Figura 107). Além disso, também se deve adicionar, na extremidade do elemento de suporte, ligadores de modo a garantir o bom funcionamento do reforço.

A ligação está sujeita a esforços de tração, na presença da braçadeira, o elemento de suporte fica sujeito a esforços de compressão perpendiculares às fibras. Por sua vez, o ligador na extremidade da chapa fica sujeito a esforços de corte duplo. Para garantir a segurança do reforço é necessário também verificar que a chapa resiste aos esforços de tração ao qual fica submetida.

$$\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot l_c} \geq f_u \quad (73)$$

$$\frac{F_d}{b \cdot b_c} \geq f_{c,90,d} \quad (74)$$

$$R_{V,d} \geq F_d \quad (75)$$

Onde b é a largura do elemento de suporte, b_c é a largura da chapa, l_c é o comprimento da chapa, $R_{V,d}$ é o valor de cálculo da capacidade resistente de parafusos por plano de corte e por ligador (EC5: 8.2.3(3)) e $f_{c,90,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão na direção perpendicular à direção das fibras.

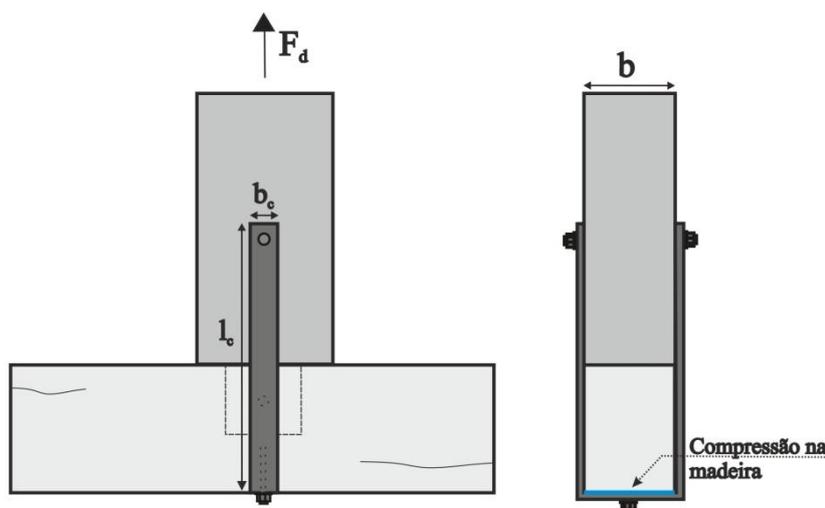


Figura 107 - Reforço da ligação com uma braçadeira em forma de U.

5.3. Cruzamentos

Nos cruzamentos, para consolidar as roturas por corte é utilizado geralmente parafusos auto-perfurantes (Figura 108). Branco et al. (2015) sugere que se usem parafusos totalmente roscados, para suspender a parte inferior da viga à parte superior e vice-versa. Além disso, também indica uma distância mínima entre o parafuso e o entalhe de $a \geq 5d$, de modo a garantir que o reforço é eficaz.

É necessário garantir que o reforço transporta a força de tração perpendicular às fibras. Para tal, utiliza-se equações desenvolvidas para vigas entalhadas (Kasal et al., 2011):

$$F_{t,90,d} = 1,3 \cdot V_d [3 \cdot (1 - \alpha)^2 - 2 \cdot (1 - \alpha)^3] \quad (76)$$

Onde $F_{t,90,d}$ é a força de tração segundo a direção perpendicular à direção das fibras, V_d é a força de corte de projeto e α é o valor de e_2/h_1 .

Para alcançar uma maior capacidade de carga os parafusos devem estar inclinados perpendicularmente às fibras, tal como se encontra representado na Figura 109.

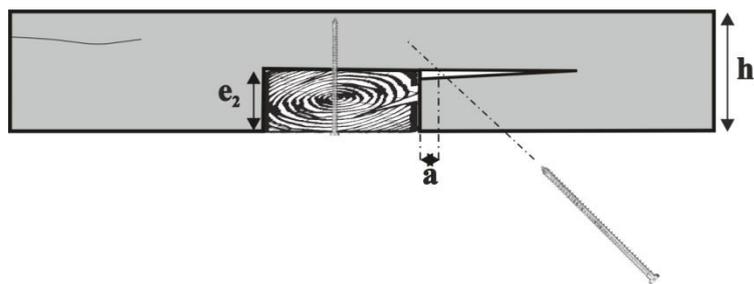


Figura 108 – Reforço com parafuso auto-perfurante inclinado em relação às fibras.

Nos cruzamentos submetidos à tração é possível usar como solução de reforço chapas metálicas, ligadores metálicos ou braçadeira.

As chapas metálicas, em forma de T (ver Figura 109), são colocadas em cada um dos lados da ligação e fixas com recurso a ligadores metálicos nas extremidades da chapa. Para que o reforço seja eficaz, é necessário garantir que a chapa resiste aos esforços de tração e os ligadores aos esforços de corte.

$$\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot l_c + 2 \cdot b_d \cdot l_d} \geq f_u \quad (77)$$

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} \geq F_d \quad (78)$$

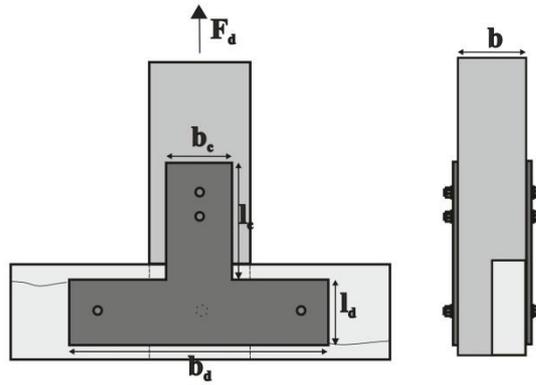


Figura 109 - Reforço da ligação com duas chapas metálicas em forma de T.

A adição de ligadores na zona do entalhe (Figura 110) para restabelecer a capacidade de carga é uma outra solução de reforço.

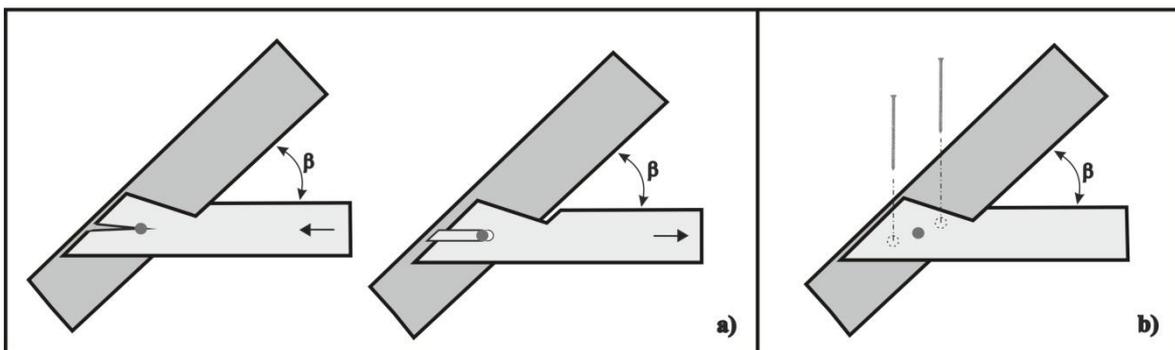


Figura 110 - Cauda de andorinha: a) modos de rotura; b) reforço com parafusos auto-perfurantes.

Neste caso é necessário garantir que a capacidade resistente dos ligadores é superior à força a que está sujeita a ligação.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} \geq F_d \quad (79)$$

A braçadeira é uma solução de reforço que envolve a ligação (ver Figura 111) e permite absorver os esforços de tração, transmitindo-os ao elemento de suporte, ao ligador e à chapa metálica.

$$\frac{F_d}{2 \cdot b_c \cdot l_c} \geq f_u \quad (80)$$

$$\frac{F_d}{b \cdot b_c} \geq f_{c,90,d} \quad (81)$$

$$R_{V,d} \geq F_d \quad (82)$$

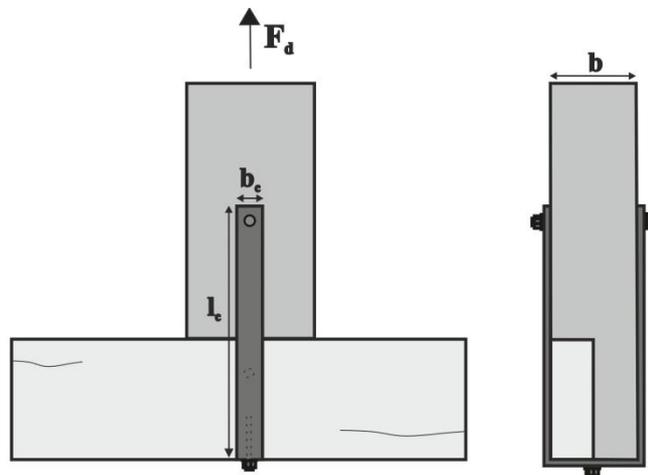


Figura 111 - Reforço da ligação com uma braçadeira em forma de U.

É necessário ter em conta que a adição de qualquer dos um dos reforço, citados anteriormente, afeta a rigidez da ligação. O que deve ser devidamente ponderado e estudado, uma vez que podem impedir o livre movimento dos elementos que compõem a ligação e alterar negativamente o comportamento original da ligação e, conseqüentemente, da estrutura.

5.4. Empalmes

A técnica tradicional de reforço das ligações por empalmes passa pela adição de ligadores metálicos (pregos ou parafusos auto-perfurantes) nas áreas sobrepostas. Os ligadores irão absorver os esforços de tração. Assim sendo, é necessário garantir que a capacidade de carga global da ligação seja inferior à soma da capacidade de carga das n fiadas de ligadores que compõem a ligação.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} \geq F_d \quad (83)$$

Quando se opta pela colocação de elementos laterais (madeira ou metal) é necessário ter em conta a sua resistência e dos elementos de fixação ao empalme.

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} + F_{V,d} \geq F_d \text{ (madeira)} \quad (84)$$

$$n_{ef} \cdot R_{V,d} + F_u \geq F_d \text{ (metal)} \quad (85)$$

Para consolidar a ligação devido à pré-fissuração da madeira são, normalmente, utilizados parafusos auto-perfurantes (Figura 112).

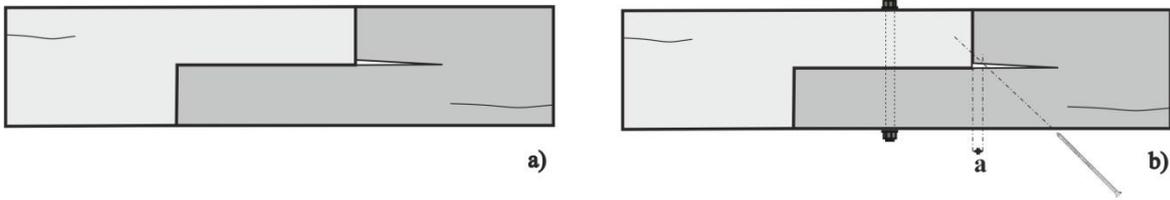


Figura 112 – Ligação sujeita a tensões perpendiculares às fibras com auto- perfurantes provocadas pelo esforço transverso: a) modo de rotura; b) reforço.

Tal como nos cruzamentos, é necessário garantir uma distância mínima entre o parafuso e o entalhe de $a \geq 5d$ e que o reforço transporta a força de tração perpendicular às fibras.

$$F_{t,90,d} = 1,3 \cdot V_d [3 \cdot (1 - \alpha)^2 - 2 \cdot (1 - \alpha)^3] \quad (86)$$

Uma outra solução de reforço corresponde à inserção de varões de aço em negativos realizados nos elementos que compõem a ligação (Figura 113). Na execução dos negativos é necessário garantir que a distância mútua entre os varões seja de $5d$ e a distância mínima dos varões às arestas de $2,5d$, de modo a evitar a fissuração da madeira paralelamente aos varões.

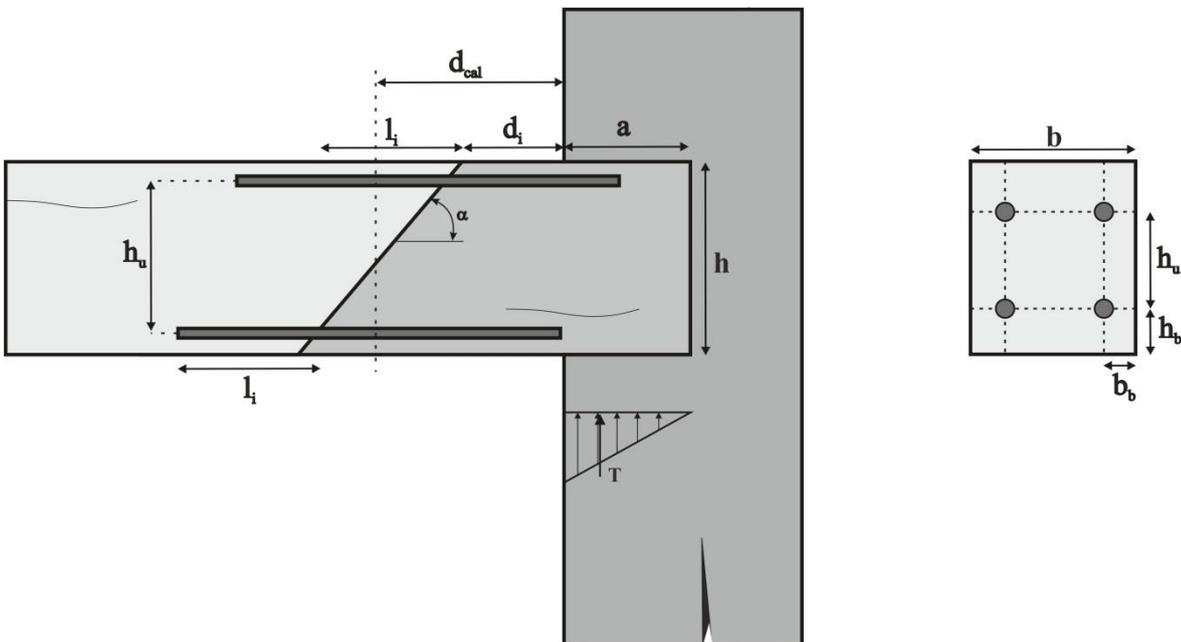


Figura 113 – Empalmes reforçados com varões de aço inseridos em negativos executados na ligação.

Para que a intervenção de reforço assegure uma boa transferência de esforços localizados, é necessário garantir que:

$$F_{ax,d} = \min(F_1, F_2, F_3) > N_d \quad (87)$$

$$F_1 = \pi \cdot d_{eq} \cdot l_{ad} \cdot f_{ad,k} \quad (88)$$

Onde F_1 é a força de arranque do varão, d_{eq} é o diâmetro equivalente: $\min \{ \text{diâmetro do rasgo}; 1,10 \cdot d \}$, l_{ad} é o comprimento de ancoragem: $\max \{ 0,5 \cdot d^2; 10 \cdot d \}$ e $f_{ad,k}$ é a resistência característica ao corte na interface de ligação e é dada por (Tabela 7):

Tabela 7 – Valor de $f_{ad,k}$ tendo em conta o comprimento de ancoragem.

| | $l_{ad} \leq 250 \text{ mm}$ | $250 < l_{ad} \leq 500 \text{ mm}$ | $500 < l_{ad} \leq 1000 \text{ mm}$ |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| $f_{ad,k} \text{ (MPa)}$ | 4 | $5.25 - 0.005 l_{ad}$ | $3.5 - 0.0015 l_{ad}$ |

$$F_2 = f_{t,0,k} \cdot A_{eff} \quad (89)$$

Onde F_2 é a força de rotura da madeira, $f_{t,0,k}$ é a tensão de tração característica da madeira paralela às fibras e A_{eff} é a área de influência de cada varão e é dada por:

$$\text{Se } b_b \geq 3 \cdot d: A_{eff} = (3 \cdot d + b_b) \times (3 \cdot d + b_b) \quad (90)$$

$$\text{Se } h_b \geq 3 \cdot d: A_{eff} = 6 \cdot d \times 6 \cdot d \quad (91)$$

$$F_3 = f_{y,k} \cdot A_{res} \quad (92)$$

Onde F_3 é a força de rotura do aço, $f_{y,k}$ é a resistência característica à tração do aço e A_{res} é a área resistente dos varões.

Atendendo ao mecanismo de distribuição das forças (ver Figura 114) é possível determinar a força a que cada varão está sujeita (N_d), que é dada por:

$$N_d = \frac{N_1}{4} + \frac{N_2}{2} \quad (93)$$

$$N_1 = T_{calc} \cdot \tan \alpha \quad (94)$$

$$N_2 = \frac{M_{\text{calc}}}{h_u} \quad (95)$$

Onde T_{calc} é a força admitindo uma distribuição triangular de carga devido ao esmagamento, M_{calc} é o momento de cálculo e h_u é a distância entre varões.

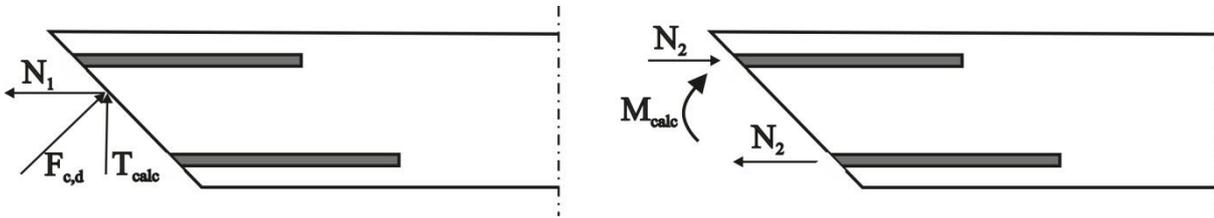


Figura 114 – Mecanismo de distribuição das forças.

No Anexo A, encontre um manual sobre as ligações tradicionais de madeira o qual resume os tópicos abordados neste trabalho, nomeadamente tipologia, geometria e dimensionamento de ligações tradicionais e técnicas de reforço e respetivo dimensionamento.

Capítulo 6

PROGRAMA EXPERIMENTAL SOBRE LIGAÇÕES COM DENTE SIMPLES

As ligações tradicionais por entalhe são usadas para ligar elementos estruturais que concorrem em ângulo e estão submetidas a forças de compressão.

As forças internas que compõem a ligação são: compressão no entalhe; tração na linha e a reação de apoio vertical. Os modelos analíticos, apresentados anteriormente (ver capítulo 3), baseiam-se nesta suposição para avaliar a capacidade resistente das ligações por entalhe. Os modos de rotura apresentados por estes modelos assentam sobretudo nas tensões de compressão na superfície frontal do entalhe e tensões tangenciais de corte ao longo do talão. Contudo, outros modos de rotura também são mencionados: tensão de compressão na superfície mais longa do entalhe e tensão na secção transversal reduzida no entalhe.

A resistência ao corte da ligação depende da superfície de corte paralela às fibras na frente do entalhe. Para evitar a rotura por corte é necessário respeitar um comprimento mínimo do talão de 150 mm (DB-SE-M, 2009; SIA 265, 2012) ou 200mm (DIN 1052, 2005) para dente simples.

No âmbito experimental, vários têm sido os estudos (Parisi et al., 2000; Branco et al., 2005; Branco et al., 2006b; Parisi et al., 2010; Parisi et al., 2008) realizados com o objetivo de

avaliar a distribuição de tensões na superfície de contacto, a rigidez e resistência rotacional da ligação para determinados níveis de força axial.

O presente estudo experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e constituiu num ensaio à compressão de ligações de dente simples, à escala real, com um ângulo de abertura de 60°. O estudo experimental baseou-se na realização de um conjunto de ensaios monotónicos de ligações com dente simples. Numa primeira fase, foram ensaiadas ligações sem reforço que posteriormente foram reforçadas com parafusos auto-perfurantes. Os ensaios realizados em ligações tradicionais de dente simples, sem reforço, encontram-se resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Tipos de ensaios realizados no estudo experimental.

| | |
|-----------------|--|
| Ensaio 1 | Teste solicitado apenas à compressão. |
| Ensaio 2 | Teste solicitado à compressão e ao corte, com $l_v=263.5\text{mm}$. |
| Ensaio 3 | Teste solicitado à compressão e ao corte, com $l_v=190\text{mm}$. |
| Ensaio 4 | Teste solicitado à compressão e ao corte, com $l_v=160\text{mm}$. |
| Ensaio 5 | Teste solicitado à compressão e ao corte, com $l_v=130\text{mm}$. |
| Ensaio 6 | Teste solicitado à compressão e ao corte, com $l_v=60\text{mm}$. |

O objetivo do estudo experimental consiste em avaliar o efeito da alteração do comprimento do talão sobre os modos de rotura, comparar o valor da capacidade resistente obtida com a capacidade resistente calculada por modelos analíticos propostos e avaliar a eficiência do reforço.

6.1. Caracterização da madeira e geometria da ligação

A ligação ensaiada corresponde a uma ligação tradicional de dente simples (ver Figura 115), sem respiga ou mecha, de laminado colado com classe de resistência GL24h e secção transversal $60 \times 100 \text{ mm}^2$ (linha) e $60 \times 80 \text{ mm}^2$ (perna). O ângulo de inclinação (β) é de 60°. Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros geométricos de cada ensaio.

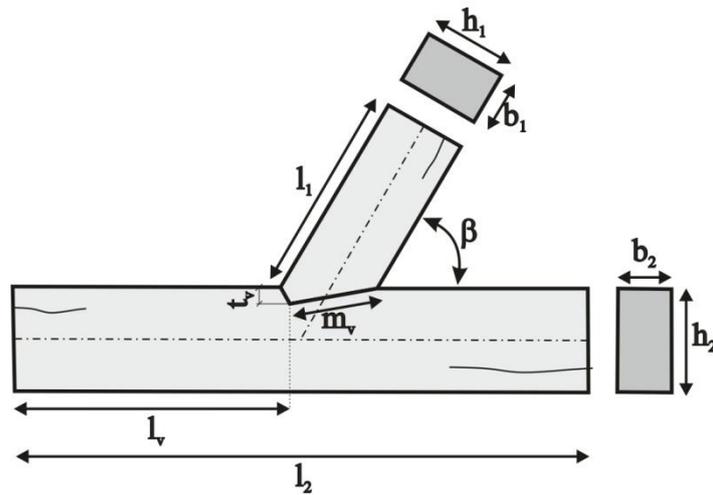


Figura 115 – Definição dos parâmetros geométricos.

Tabela 9 - Parâmetros geométricos de cada ensaio, em mm.

| Ensaio | β | l_v | m_v | t_v | l_1 | h_1 | b_1 | l_2 | h_2 | b_2 |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 60 ° | 263.5 | 85 | 15 | 203.5 | 80 | 60 | 547 | 100 | 60 |
| 2 | | 263.5 | | | | | | 547 | | |
| 3 | | 190 | | | | | | 473.5 | | |
| 4 | | 160 | | | | | | 443.5 | | |
| 5 | | 130 | | | | | | 413.5 | | |
| 6 | | 60 | | | | | | 343.5 | | |

6.2. Esquema de ensaio e instrumentação

As ligações foram colocadas sobre um cavalete metálico imóvel e solicitadas por um atuador vertical (ver Figura 116). O atuador vertical, alinhado com o eixo da perna, simula o esforço axial actuante na perna em resultado das cargas permanentes da cobertura. Ao longo do ensaio, a velocidade de aplicação da força de compressão, por parte do atuador, foi de 0.03 mm/s. Para registar a evolução do deslocamento foram utilizados dois LVDT's (Linear Voltage Differential Transducers).

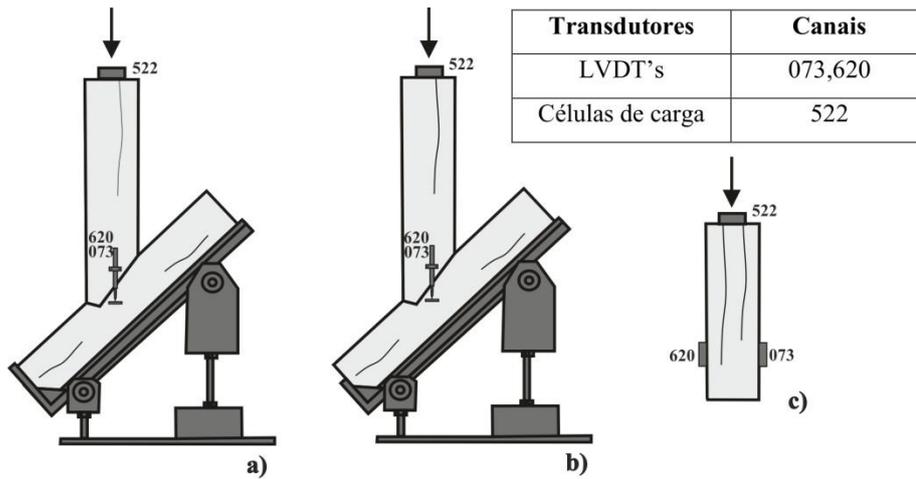


Figura 116 – Esquema de ensaio: a) Teste solicitado apenas à compressão; b) Teste solicitado à compressão e ao corte; c) Alçado do ensaio.

6.3. Soluções de reforço estudadas

O reforço de ligações tradicionais de madeira com elementos metálicos surgiu com a revolução industrial, século XIX. Desde então, o reforço tem sido aplicado para restituir o contacto entre os elementos da ligação, aumentar a capacidade de suporte ou aumentar a rigidez da ligação. Contudo, neste estudo, o objetivo do reforço consistia em prevenir o mecanismo de falha que dominou o comportamento das ligações sem reforço, alterando o caminho das forças. Para tal, foram aplicados nos elementos que constituem a ligação parafusos auto-perfurantes (ver Figura 117).

De entre os vários tipos de técnicas de reforço disponíveis (varão interno, braçadeira, esquadro, etc.), hoje em dia, os parafusos auto-perfurantes têm encontrado um amplo campo de aplicação por serem um sistema de reforço económico e de fácil aplicação (Dietsch et al., 2015; Lathuillière et al., 2015).

Os parafusos auto-perfurantes utilizados no reforço tinham um diâmetro de 8 mm e um comprimento de 100 mm.

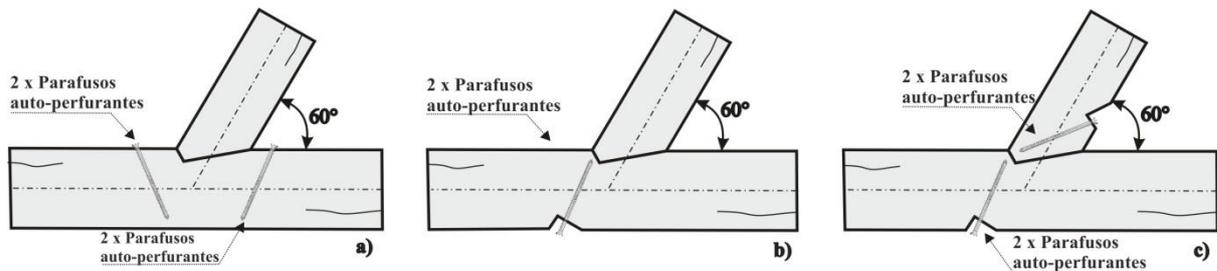


Figura 117 – Reforço das ligações tradicionais de dente simples com parafusos auto-perfurantes: a) ensaio 1; b) ensaio 4; c) ensaio 5.

6.4. Resultados dos ensaios

Os seguintes resultados referem-se a testes monotónicos realizados a fim de determinar a capacidade de carga e modo de rotura de uma ligação tradicional de dente simples à qual se fez variar o comprimento do talão. Estas 5 ligações testadas estavam sujeitas a esforços de compressão e corte. Contudo, também foi analisado o comportamento de uma ligação de dente simples sujeitas apenas a esforços de compressão – ensaio 1.

Comparando os resultados experimentais dos ensaios 1 e 2 (ver Figura 118), em termos de curva força-deslocamento, verifica-se que as duas curvas tendem a aproximar-se e chegam a atingir no final do ensaio valores de capacidade de carga e deslocamento próximos. Em termos de modo de rotura (Tabela 10), em ambas os ensaios verificou-se deformação plástica sob as superfícies do entalhe, em maior grau sob a superfície frontal do entalhe. No ensaio 1, também se verificou, apenas de um lado, devido à existência de um nó perto do entalhe, a formação de uma superfície de corte. A rotura por corte local, caracterizada por um comportamento frágil que na Figura 118 corresponde à descida súbita na capacidade resistente da ligação, impediu uma grande deformação plástica na superfície de contacto.

As amostras à qual se fez variar o comprimento do talão (ver Figura 118), em termos de curva força-deslocamento, apresentam um comportamento tendência semelhante que se caracteriza por uma fase inicial de resposta não linear, devido ao ajuste da ligação face ao carregamento, e posteriormente uma fase elástica que quando atinge o limite, o comportamento frágil é substituído por um comportamento pós-elástico em resultado do esmagamento localizado da madeira. Com exceção da amostra do ensaio 6, ao qual corresponde o menor comprimento do talão, que apresenta um comportamento bastante instável.

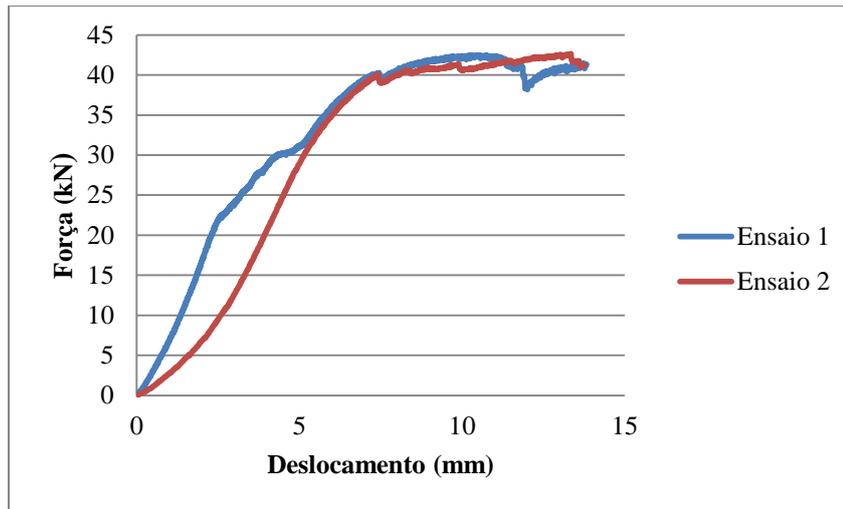


Figura 118 - Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios monotônicos.

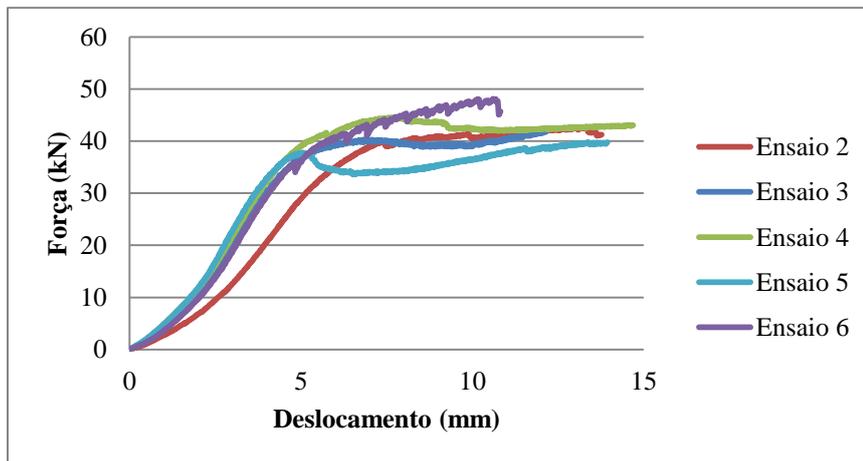
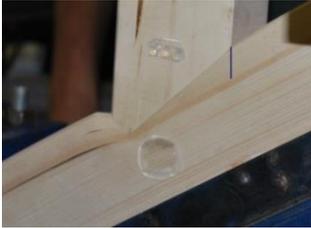


Figura 119 - Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios monotônicos.

De um modo geral, o modo de rotura das ligações testadas (ver Tabela 10) ocorreu por esmagamento da superfície frontal do entalhe, fazendo-se notar alguma deformação plástica na superfície anterior do entalhe. No entanto, no ensaio com menor l_v ($l_v=60$ mm), embora tenha ocorrido uma pequena deformação da superfície do entalhe, o modo de rotura ocorreu na zona de apoio da amostra com abertura de uma fenda.

Relativamente à capacidade de carga máxima, com a diminuição do comprimento do talão, a tendência foi aumentar a capacidade de carga. Com exceção do ensaio 3 e 5, à qual corresponde respetivamente um $l_v= 190$ e 130 mm, e apresentam um valor de $F_{d, máx}$ inferior aos restantes ensaios.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios experimentais.

| Ensaio | $F_{d,máx}$ (kN) | Modo de rotura |
|--------|------------------|--|
| 1 | 42.49 |  |
| 2 | 42.65 |  |
| 3 | 41.9 |  |
| 4 | 44.53 |  |
| 5 | 39.82 |  |
| 6 | 48.09 |  |

Às curvas experimentais força-deslocamento foram ajustadas leis bi-lineares tendo por base o princípio da igualdade da energia dissipada tal como sugere a norma EN 12512:2001 (Figura 120). Estas leis bi-lineares são passíveis de utilização em modelos de comportamento, a implementar por exemplo em softwares de cálculo, e permitem uma quantificação direta da rigidez elástica e pós-elástica. Além disso, permitem assim uma análise da resposta das ligações estudadas em termos de força, rigidez e ductilidade, tendo por base um método exato e simples.

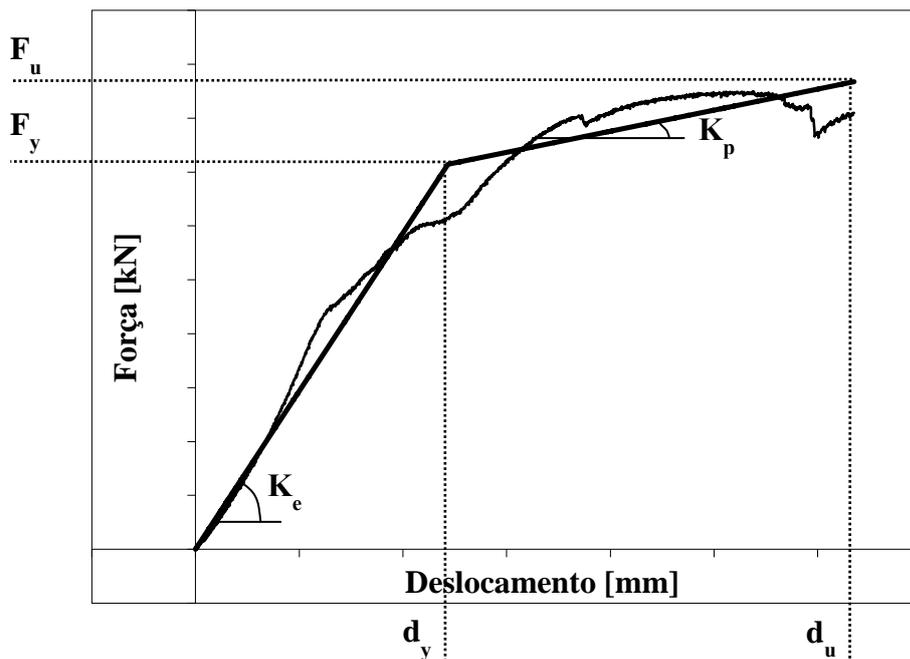


Figura 120 – Aplicação da lei bi-linear à curva força-deslocamento.

A resistência que a ligação oferece quando solicitada por uma força de compressão é traduzida pela sua rigidez. Em regime elástico, as ligações apresentam valores de rigidez aproximados, à excepção da ligação do ensaio 2 que apresenta um valor de rigidez inferior às restantes (ver Tabela 11). Em regime pós-elástico, os valores de rigidez são menores uma vez que a capacidade da ligação se deformar é maior devido ao esmagamento das fibras na superfície do entalhe (ver Tabela 11). No caso do ensaio 4, a rigidez pós-elástica é negativa, o que significa que a capacidade de carga máxima ($F_{d,máx}$) corresponde à capacidade de carga elástica (F_y).

O índice de ductilidade estático (D) corresponde ao quociente entre o deslocamento máximo (último) e o deslocamento estático. De acordo com a Tabela 11, o ensaio 4 é o que apresenta

um índice de ductilidade estática menor, ao contrário do ensaio 5 cuja capacidade de se deformar é superior e portanto o índice de ductilidade estática é maior.

Tabela 11 – Rigidez elástica (k_e), rigidez pós-elástica (k_p), deslocamento elástico (d_y) deslocamento máximo (d_u) e índice de ductilidade estático (D) dos ensaios monotónicos.

| | k_e (kN/mm) | k_p (kN/mm) | d_y (mm) | d_u (mm) | D |
|-----------------|---------------|---------------|------------|------------|------|
| Ensaio 1 | 7.84 | 1.20 | 4.33 | 10.66 | 2.46 |
| Ensaio 2 | 5.47 | 0.41 | 7.27 | 13.25 | 1.82 |
| Ensaio 3 | 7.16 | 0.23 | 5.45 | 11.33 | 2.08 |
| Ensaio 4 | 7.61 | -0.1 | 5.68 | 9.13 | 1.56 |
| Ensaio 5 | 7.60 | 0.54 | 4.46 | 12.98 | 2.91 |
| Ensaio 6 | 6.97 | 1.52 | 5.88 | 10.74 | 1.83 |

6.4.1. Avaliação das soluções reforçadas

Nas ligações sem reforço verificou-se plastificação das superfícies de contacto, especialmente a zona frontal do entalhe, e rotura por corte. De modo a evitar a disseminação destes modos de falha e aumentar o contacto entre os elementos que sofreram delaminação, optou-se por reforçar, estrategicamente, as ligações com parafusos auto-perfurantes.

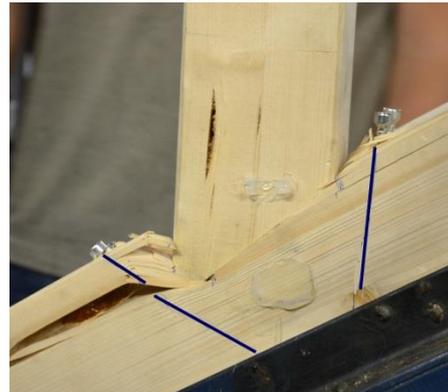
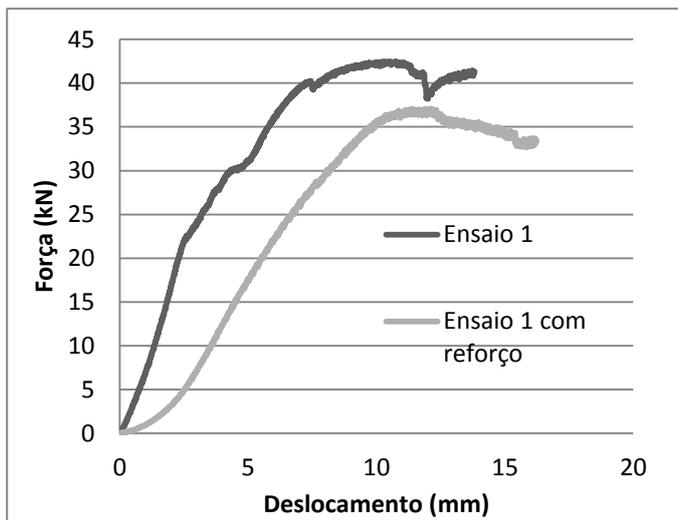
Os parafusos encontravam-se inclinados, em relação ao elemento a reforçar, de modo a obter maior capacidade de carga.

No ensaio 1 com reforço, sobre o elemento horizontal (linha), foram colocados dois parafusos na superfície superior da parte frontal e traseira ao entalhe (ver Figura 117.a)). Na parte traseira, com a colocação do parafuso auto-perfurante, ocorreu a formação de uma fenda no entalhe. Além disso, verificou-se fragmentação da superfície da madeira aquando da pré-perfuração.

Ambas as ligações, com e sem reforço, tiveram um comportamento semelhante (ver Figura 121.a)). Contudo, a capacidade de carga da ligação reforçada foi inferior (-17%) em relação à ligação sem reforço e os deslocamentos foram maiores na ligação com reforço.

Na fase inicial, a curva força- deslocamento teve menor declive em resultado do ajuste da ligação face à fenda que se formou na parte traseira. Quando a ligação atinge o limite elástico, o comportamento frágil é substituído por um comportamento pseudo- plástico em resultado do esmagamento localizado da madeira.

Ao longo da realização do ensaio, verificou-se um aumento da superfície de corte, ao longo do talão, e da deformação na superfície de contacto (Figura 121.b)). Contudo, a rotura por corte não permitiu uma grande deformação plástica da ligação. Por fim, a fenda que se formou aquando da colocação dos parafusos, em virtude da distância à zona do entalhe ser pequena, manteve-se igual.



a)

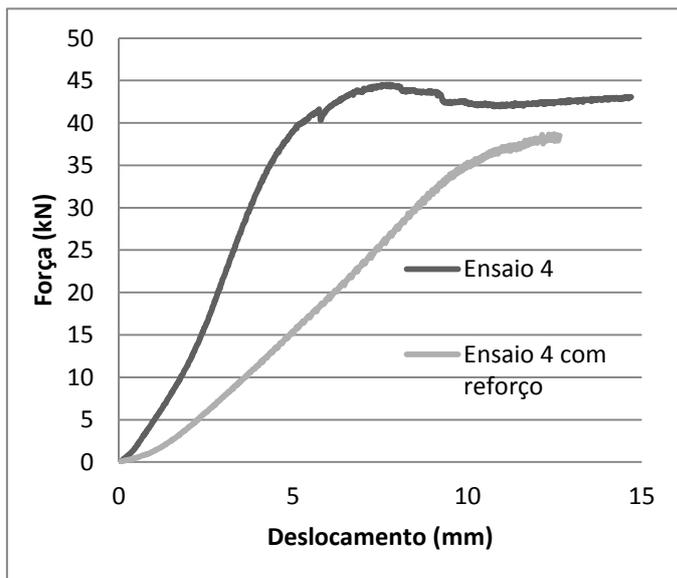
b)

Figura 121 – Ligação reforçada com 4 parafusos auto-perfurantes: a) gráfico força-deslocamento da ligação sem reforço e com reforço; b) modo de falha da ligação reforçada.

No ensaio 4 com reforço foram colocados dois parafusos na superfície inferior, frontal ao entalhe, do elemento horizontal da ligação (ver Figura 117.b)).

A ligação com reforço apresenta um valor de capacidade resistente inferior (-15%) ao da ligação sem reforço. O seu comportamento traduziu-se numa curva de força-deslocamento dominante na zona elástica (ver Figura 122.a)).

Em termos de deformação, verificou-se apenas esmagamento da superfície de contacto (ver Figura 122.b)).



a)



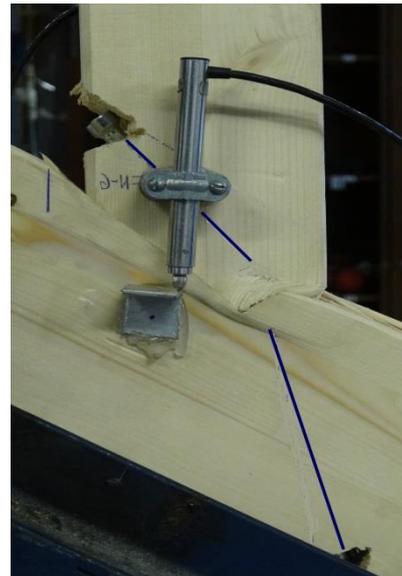
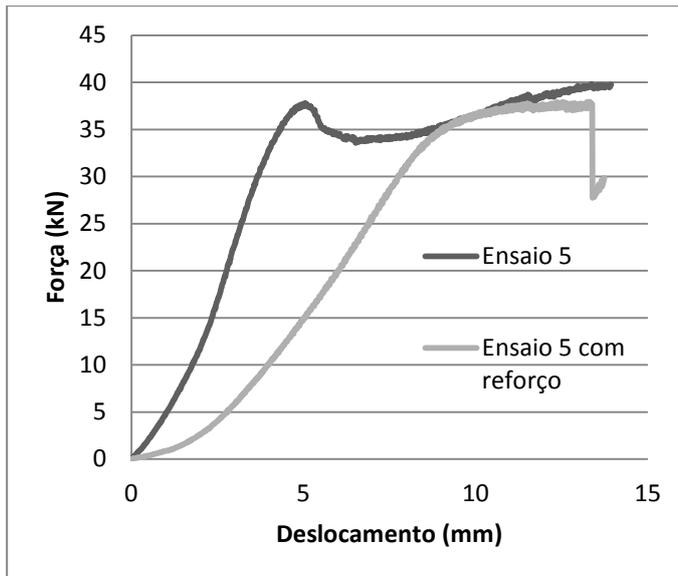
b)

Figura 122 - Ligação reforçada com 2 parafusos auto-perfurantes: a) gráfico força-deslocamento da ligação sem reforço e com reforço; b) modo de falha da ligação reforçada.

No ensaio 5 com reforço, sobre o elemento horizontal (linha) e o elemento inclinado (perna), foram colocados dois parafusos auto-perfurantes em cada elemento (ver Figura 117. c)).

Tendo em conta a curva força-deslocamento (ver Figura 123.a)), verifica-se que após ser atingido o limite de deformação elástica, dá-se uma redução na área de contacto a qual se traduz em escorregamento entre os elementos em contacto. Na fase final do ensaio, verifica-se uma perda súbita de resistência em consequência do craqueamento da madeira, na zona frontal ao entalhe, devido à existência de um nó (ver Figura 123.b)).

Em termos de capacidade de carga, registou-se um valor aproximado da ligação sem e com reforço, contudo a ligação com reforço registou um valor menor (- 5%).



a)

b)

Figura 123 - Ligação reforçada com 4 parafusos auto-perfurantes: a) gráfico força-deslocamento da ligação sem reforço e com reforço; b) modo de falha da ligação reforçada.

Tendo em conta os dados da Tabela 12, conclui-se que a rigidez das ligações reforçadas é menor do que as ligações sem reforço, á exceção do ensaio 4 no qual se verifica em regime pós-elástico um aumento de rigidez face à ligação não reforçada. Por sua vez, os deslocamentos são superiores nas ligações com reforço, o que significa que a capacidade da ligação com reforço se deformar é maior e traduz-se por índices de ductilidade significativamente mais elevados face aos da ligação sem reforço. No entanto, no ensaio 5 verifica-se que o quociente entre o deslocamento último e estático é menor face às ligações sem reforço.

Tabela 12 – Comparação da Rigidez elástica (k_e), rigidez pós-elástica (k_p), deslocamento elástico (d_y) deslocamento máximo (d_u), índice de ductilidade estático (D) e capacidade de carga máxima ($F_{d,máx}$) dos ensaios monotónicos de ligações com e sem reforço.

| | k_e (kN/mm) | k_p (kN/mm) | d_y (mm) | d_u (mm) | D |
|-----------------------------|---------------|---------------|------------|------------|------|
| Ensaio 1 | 7.84 | 1.20 | 4.33 | 10.66 | 2.46 |
| Ensaio 1 com reforço | 3.56 | 0.09 | 10.19 | 42.73 | 4.19 |
| Ensaio 4 | 7.61 | -0.1 | 5.68 | 9.13 | 1.56 |
| Ensaio 4 com reforço | 3.37 | 1.01 | 10.92 | 47.24 | 4.33 |
| Ensaio 5 | 7.60 | 0.54 | 4.46 | 12.98 | 2.91 |
| Ensaio 5 com reforço | 3.54 | -2.00 | 11.03 | 13.39 | 1.21 |

6.4.2. Comparação dos valores teóricos e experimentais

No Eurocódigo 5 não são abordadas regras para a verificação da segurança das ligações. O que leva a que existam diferentes bases teóricas, que diferem sobretudo no modo como se as forças se distribuem nas superfícies de contacto, para determinar analiticamente a capacidade de carga que condiciona a segurança das ligações. Neste estudo, foi realizada uma análise sobre a Norma Suíça (SIA 265, 2012), Norma Espanhola (DB-SE-M, 2009), Norma Alemã (DIN 1052, 2005), Anexo nacional Holandês do EC5 (NEN-EN 1995-1-1, 2013) e as considerações de Thierry Descamps⁸(Tabela 13).

Tabela 13 – Cargas (F_d) condicionantes que conduzem à rotura, em kN.

| | | A.N. holandês do EC5 | Norma Suíça e Espanhola | Norma Alemã | Thierry Descamps |
|---|---------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|---------------------|
| Ensaio 1 | Teórico | 17.3 | 14.5 | 12.1 | 9.7 |
| | Experimental | 42.5 | | | |
| | Incremento* | +146% | +193% | +251% | +338% |
| Ensaio 2 | Teórico | 17.3 | 14.5 | 12.1 | 9.7 |
| | Experimental | 42.7 | | | |
| | Incremento | +147% | +194% | +253% | +340% |
| Ensaio 3 | Teórico | 17.3 | 14.5 | 12.1 | 9.7 |
| | Experimental | 41.9 | | | |
| | Incremento | +142% | +189% | +246% | +332 |
| Ensaio 4 | Teórico | 17.3 | 14.5 | 12.1 | 9.7 |
| | Experimental | 44.5 | | | |
| | Incremento | +157% | +207% | +268% | +359 |
| Ensaio 5 | Teórico | 17.3 | 14.5 | 12.1 | 9.7 |
| | Experimental | 39.8 | | | |
| | Incremento | +130% | +328% | +229% | +310% |
| Ensaio 6 | Teórico | 15.6 | 14.5 | 12.1 | 9.7 |
| | Experimental | 48.1 | | | |
| | Incremento | +208% | +232% | +298% | +396% |
| *Corresponde ao aumento de carga sobre o teórico. | | | | | |

⁸ http://www.costfp1101.eu/images/TS%20mons/Carpentry%20Joints_Thierry%20Descamps.pdf

A capacidade de carga teórica, das diferentes bases de estudo, resulta numa elevada subestimação face aos resultados experimentais. A fórmula apresentada por Thierry Descamps apresenta valores mais conservadores e a capacidade de carga é limitada por compressão na superfície frontal do entalhe, tal como na Norma Suíça, Espanhola e Alemã. Por sua vez, a norma que apresenta um menor incremento face aos valores experimentais é a holandesa. A capacidade de carga da norma holandesa, que admite a decomposição da força segundo uma componente horizontal e uma componente vertical, ocorre por compressão na superfície frontal do entalhe, à exceção do ensaio 6 que ocorre por corte ao longo do talão.

6.5. Conclusão

A capacidade de carga de uma ligação tradicional de dente simples, com um ângulo de abertura de 60° e com um l_v variável, submetida a ensaios monotónicos à compressão, foi medida entre 39.8 e 48.1 kN. O esmagamento das fibras na superfície do entalhe foi o modo de rotura praticamente comum a todos os ensaios. Contudo, o que se pretendia era verificar que para um determinado comprimento do talão, inferior ao definido pelas normas, o modo de rotura que se verificava era o corte ao longo da superfície do entalhe. Como tal não aconteceu, em virtude da geometria adotada (valor elevado do ângulo (60°)), que leva a que a componente horizontal da força origine o esmagamento da superfície de contacto e não desenvolva corte. Assim sendo, não é possível verificar se o comprimento mínimo definido pelas normas é ou não muito conservativo.

Relativamente às intervenções de reforço, de um modo geral, foram eficazes dado que a capacidade de carga máxima da ligação reforçada aproximou-se da original. Contudo, verificou-se que este tipo de intervenção pode reduzir significativamente a rigidez inicial e global da ligação. Além disso, averiguou-se que a solução de reforço adotada no ensaio 1, que tinha como objetivo evitar o aumento do modo de rotura por corte, não foi eficientemente eficaz, uma vez que não controlou eficazmente a propagação da falha de corte. Os melhores resultados ocorreram na solução de reforço em que foram colocados parafusos auto-perfurantes na linha e na perna. Contudo, as deformações nas áreas em contacto foram maiores o que põe em causa a sua viabilidade quando aplicada a uma estrutura.

As abordagens analíticas estudadas, apesar de serem diferentes, quando comparadas com os resultados dos ensaios, oferecem valores muito conservadores da capacidade de carga máxima

da ligação com dente simples. E de entre as fórmulas de cada abordagem, as referentes à superfície frontal do entalhe, são as que apresentam valores de capacidade de carga mais condicionantes, apesar dos diferentes ângulos α de carregamento face às fibras considerado por cada abordagem.

Os resultados dos ensaios apresentados são preliminares e não tem consistência, pelo que seria necessário testar um maior número de amostras e sobretudo com outros ângulos de abertura da ligação.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. Considerações finais

A tese teve como principal objetivo colmatar a falta de informação existente no EC5 (EN 1995-1: 2010) no que se refere ao reforço de ligações tradicionais de madeira, através da definição de regras e modelos de dimensionamento destas ligações e do seu reforço.

O trabalho desenvolvido baseou-se numa primeira fase de pesquisa sobre tipologias, geometria, dimensionamento e reforço de ligações tradicionais, mas teve ainda uma fase experimental.

Tendo em conta a diversidade de ligações aplicadas às estruturas tradicionais de madeira, houve necessidade de as agrupar. Assim sendo, dependendo da natureza e nível de tensões atuantes, é possível definir um conjunto de ligações tipo, cuja tipologia define o grupo a que pertence: entalhes, empalmes, cruzamentos e acoplamentos.

As ligações por entalhes, ao qual está associado a formação de um sulco em forma de “V” nas superfícies dos elementos a ligar, incluem o dente simples, podendo possuir respiga e mecha, o dente simples posterior e o dente duplo. O dente simples é a ligação por entalhe mais comum, no entanto quando o comprimento do talão é insuficiente recorre-se ao dente simples posterior. O dente duplo é constituído por um dente simples e um dente simples posterior, aumentando a superfície de contacto no entalhe e permite que a força de compressão forme

um binário de formas que se distribui por cada superfície do entalhe. Ao nível das superfícies dos entalhes, devido à redução efectiva da secção dos elementos na zona do entalhe, geram-se concentração de tensões que são transmitidas por compressão e/ou atrito na interface dos elementos ligados. Sendo que o estado de tensão que se gera nas superfícies de contacto garante a integridade da ligação e impede que os elementos se separem, pelo é importante garantir que não há descompressão da ligação. A respiga e a mecha, representam uma secção de extremidade de menor dimensão, que quando presentes nas ligações garante a perfeita conexão entre os elementos ligados e evitam deslocamentos para fora do plano da ligação.

Nos cruzamentos, a espessura dos elementos é reduzida, geralmente para metade na zona da ligação, e os elementos são aglutinados formando entre si um ângulo reto ou mais ou menos oblíquo. Tendo em conta a forma e a localização do entalhe nos elementos a ligar, existem diferentes tipos de cruzamentos. Neste tipo de ligação as forças são transmitidas através do contacto entre os elementos de madeira, as quais podem estar sujeitas a esforços de compressão, tracção ou corte.

Os empalmes garantem a continuidade longitudinal dos elementos através da união, ponta a ponta, de dois ou mais elementos de madeira. Neste tipo de ligação, as forças podem ser transmitidas por compressão ou tração. Quando o empalme é solicitado à compressão, a transmissão de esforços é realizada entre as superfícies de contacto e o deslizamento é impedido pelo encaixe entre os elementos e, em alguns casos, devido ao uso de ligadores metálicos ou pinos de madeira. No entanto, quando a ligação é solicitada por forças de tração, a transmissão de esforços pode ocorrer por compressão e tensões tangenciais de corte nas superfícies do entalhe ou apenas pelos ligadores metálicos/ pinos de madeira (união a meio fio), usados para garantir a estabilidade do conjunto e evitar o deslizamento das superfícies. Existe uma diversidade de empalmes, os quais resultaram da tentativa de melhor o comportamento dos empalmes existentes, e variam consoante a forma e inclinação do entalhe. Por fim, os acoplamentos resultam da sobreposição de dois ou mais elementos de madeira, permitindo aumentar a sua secção transversal do elemento de madeira.

A definição da geometria da ligação, que no passado resultou de conhecimentos empíricos e regras simplificadas, é um aspeto crucial para o bom funcionamento da ligação. Hoje em dia, já existem algumas regras geométricas para as ligações com entalhes. E também uma série de ensaios experimentais (Parisi et al., 2000; Parisi et al., 2002; Branco et al., 2006b; Branco et al., 2005) já foram desenvolvidos para avaliar a influência de cada um dos parâmetros que define a geometria deste tipo de ligações. No entanto, para as restantes ligações essa

informação é escassa, ou até mesmo inexistente, pelo que há a necessidade de estabelecer/definir regras para a geometria das ligações tradicionais de madeira.

A maioria das ligações resulta da redução da secção dos elementos a ligar, à qual está associada uma perda da capacidade resistente dos elementos, pelo que é necessário fazer um correto dimensionamento e garantir os níveis de segurança, tendo em conta as solicitações que contribuem para a resistência da ligação. Assim sendo, houve necessidade de recolher informação sobre o dimensionamento de ligações tradicionais de madeira. No âmbito das ligações entalhadas com dente, existem diferentes critérios de verificação de segurança, consideradas pelas diferentes autores e normas nacionais, que diferem sobretudo na decomposição das forças sobre as superfícies de contacto e no facto de ter em conta, ou não, o contributo do atrito para a resistência da ligação. No entanto, para as restantes ligações não existe informação nesse sentido. Assim sendo, para definir regras para o dimensionamento de cada uma das ligações, houve necessidade de compreender o comportamento da ligação quando solicitada por uma força.

Às ligações tradicionais estão associadas um conjunto de patologias fruto do envelhecimento ou degradação prematura, erros de projeto ou de execução. Durante muitos anos, devido à falta de conhecimento e dificuldade em compreender as ligações e as estruturas, as intervenções eram excessivamente conservadoras, e por vezes aumentavam substancialmente a rigidez das ligações, ou em casos mais extremos, optavam pela remoção parcial ou completa da estrutura. Surge assim a necessidade de desenvolver um processo criterioso que permita avaliar e compreender o tipo de patologia e intervir sobre os elementos, reparando ou reforçando a ligação, de modo a restituir os níveis de segurança e a preservar o valor histórico e cultural da estrutura. Tendo em conta a diversidade de intervenções existentes ao nível das ligações tradicionais de madeira, houve necessidade de as dividir em soluções de reparação e reforço, dado que as soluções de reparação envolvem um conjunto de intervenções ligeiras que permitem repor e/ou melhorar o desempenho da ligação e, por sua vez, as intervenções de reforço passa por uma análise do tipo de ligação, da sua geometria e do tipo de rotura e envolve a adição de elementos de madeira, metálicos ou compósitos.

As técnicas de reforço aplicadas nas ligações tradicionais têm como principais objetivos melhorar o seu comportamento ao nível da resistência e ductilidade. No entanto, para que estes objetivos sejam atingidos é necessário assegurar um correto dimensionamento e aplicação do reforço. Nesse sentido, no capítulo 5, são apresentadas regras de verificação de

segurança para cada técnica de reforço de cada ligação. Em particular, as que utilizam ligadores/elementos metálicos por se tratar das soluções de reforço mais comuns.

Por fim, no capítulo 6 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais em ligações com dente simples sem respiga. Numa primeira fase, o objetivo do ensaio consistia em avaliar a influência da variação do comprimento do talão em termos de modos de rotura, tendo em conta que existem diferentes normas europeias que consideram diferentes comprimentos mínimos a partir dos quais se desenvolvem tensões de corte no talão. No entanto, os resultados dos ensaios foram inconclusivos, dado que não ocorreu o modo de rotura por corte ao longo da superfície do talão, em resultado do valor elevado do ângulo (60°) adoptado para a ligação, que leva a que a componente horizontal da força origine o esmagamento da superfície de contacto (modo de rotura verificado) e não desenvolva corte. A segunda fase dos ensaios, consistiu em reforçar a ligação com parafusos auto-perfurantes de modo a prevenir o mecanismo de falha que dominou o comportamento das ligações sem reforço. Esta técnica de reforço mostrou-se eficaz, uma vez que capacidade de carga máxima da ligação reforçada aproximou-se da ligação sem reforço. Por fim, realizou-se uma comparação entre os resultados analíticos, tendo por base os métodos de cálculo das diferentes normas europeias e autores, e os resultados experimentais. O objetivo desta fase consistiu em avaliar a percentagem associada à subestimação dos valores das bases de estudo face aos valores experimentais, no dimensionamento das ligações com dente simples. Além disso, também se pretendia verificar qual dos métodos se aproximava do valor experimental. Assim sendo, conclui-se que os valores de cálculo eram excessivamente conservadores e que a norma holandesa, apesar de ser a mais simplista, foi a que teve valores mais próximos dos obtidos em laboratório.

7.2. Desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido ao longo da tese representa uma pequena contribuição na área do reforço de ligações tradicionais de madeira. Nesse sentido, trabalhos futuros podem ser desenvolvidos para aumentar o nível de informação acerca desta temática, dado que ainda é muito escassa e pouco fundamentada, destacando-se:

- Avaliação comparativa em termos técnico-económicos das diferentes soluções de reforço de cada ligação;

- Ensaios das diferentes soluções de reforço de cada ligação, de forma a obter uma caracterização do comportamento estrutural do conjunto e avaliar a solução mais eficaz;
- Avaliar a área submetida a tensões de tração perpendiculares às fibras de uma ligação com cauda de andorinha e definir analiticamente como quantificar essa área;
- Estudar novas soluções de reforço e apresentar metodologias de cálculo para o seu dimensionamento;
- Ensaios dos diferentes tipos de ligações tradicionais, em tamanho real, com diversos tipos de madeira (castanho, carvalho, pinho, etc) e fazendo variar os parâmetros geométricos, de forma a obter uma caracterização do comportamento estrutural do conjunto (rigidez, resistência e deformabilidade);
- Ensaios de ligações com dente simples, com ou sem respiga, admitindo outros ângulos para a ligação, de forma a avaliar a influência da variação do comprimento do talão no modo de rotura da ligação.

Referências bibliográficas

- Arriaga, F., Esteban, M., Bobadilla, I., Garcia, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, ISBN: 8487381243.
- Álvarez, R. A., Martitegui, F. A. (2003). *Estructuras de madera: diseño y cálculo*. AITIM. Madrid, Spain.
- Aman, R., West, H., Cormier, D. (2008), *An evaluation of loose tenon joint strength*. Forest Products Journal, 58(3), pp. 61-64.
- Appleton, J. (2003). *Reabilitação de edifícios antigos: Patologias e tecnologias da intervenção*. Edições Orion, pp.455.
- Bastos, J. (2011). *Asnas tradicionais de madeira: caracterização e reforço*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Branco, J. (2003). *Comportamento das Ligações Tipo Cavilha em Estruturas Mistas Madeira-Betão*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Branco, J. (2008). *Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behavior of traditional timber trusses*. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques. PhD thesis, University of Minho and University of Trento.
- Branco J. (2012), *Análise e reforço de coberturas de madeira*. Seminário Coberturas de Madeira. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ISBN: 978-972-8692-68-1, pp.55-70.
- Branco, J. (2014). *Reforço de elementos existentes de madeira*. Seminário Intervir em construções existentes de madeira, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.
- Branco, J., Cruz, P., Piazza, M. (2006a). *Asnas de Madeira. A importância da rigidez das ligações*. JPEE 2006: 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa.
- Branco, J., Cruz, P., Piazza, M., Varum, H. (2006b). *Experimental Analysis of Original and Strengthened Traditional Timber Connections*. WCTE 2006. Portland, pp. 1314-1321.
- Branco J., Santos A., Cruz P. (2008). *Asnas tradicionais de Madeira: evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, n. 3, pp. 5-18.
- Branco, J., Descamps, T. (2015). *Analysis and strengthening of carpentry joints*. Construction and Building Materials. Accepted.

- CNR-DT 206 (2007). *Istruzioni per la Pogettazione: l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno*, Italy.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (2005). *Istruzioni per Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*. CNR.
- Colling, F. (2004). *Holzbau: Grundlagen Bemessungshilfen*. Vieweg, Germany.
- Costa, L. (2009). *Tipificação de soluções de reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*. Relatório de projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau mestre em Engenharia Civil- Especialização em Construções Civas, FEUP.
- Cruz, H., et al. (2000). *Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos*. REPAR 2000: Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, pp.825-834.
- Cruz, H. (2001). *Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira*. Curso livre internacional de património.
- Cruz, Helena (2011). *Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira*. 1as Jornadas de Materiais na Construção.
- Cruz, H., Custódio, J., Nascimento, J., Empis, M. (2004). *Execução e controlo de qualidade da reparação de estruturas de madeira com colas epoxídicas e FRPs*. Congresso Ibérico Americano sobre a Madeira na construção (CIMAD), Porto.
- Cruz, H., Nunes, L. (2005). *A madeira como material de construção*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil: Núcleo de Estruturas de Madeira.
- DB-SE-M (2009). *Documento Básico Seguridad Estructural- Estructuras de Madera*. Código Técnico de la Edificación, Ministério de Vivienda
- Dias, A., Cruz, H., Machado, J. S., Custódio, J. E. P., Palma, P. M. C. (2009). *Avaliação, conservação e reforço de estruturas de madeira*. Ed. José Saporiti Machado, Verlag Dashöfer Edições Profissionais Lda, Lisboa.
- Dietsch, P., Brandner, R. (2015). *Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements—A state-of-the-art report*. Construction and Building Materials.
- DIN 1052: 2004. *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken- Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*.
- EN 1995-1-1: 2010. *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization.
- EN 12512:2001 - Timber structures. Test methods – cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. CEN.

- Ehlbeck, J., Kromer, M. (1995). *Carpentry joints*. Timber Engineering STEP 1. Almere: Centrum Hout
- Faria, J. (2002). *Reabilitação de Estruturas de madeira em Edifícios Históricos*. Património: estudos, (3), pp.8-13.
- Faria, J. (2004). *Reabilitação de Estruturas de Madeira*. Palestra proferida nas 2as Jornadas de Engenharia Civil do Instituto Politécnico da Guarda.
- Feio, A. O. (2005a). *Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behaviour*. PhD thesis, University of Minho.
- Feio, A. O., Lourenço, P. B. (2005b). *Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos*. Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres, Universidade do Minho, Guimarães.
- Feio A.O., Saporiti J.M., Lourenço P.B. (2008). *Capacity of a traditional timber mortise and tenon joint*. SAHC 2008 - Structural Analysis of Historical Constructions, Bath, UK, pp. 833-841.
- Feio, A. O., Lourenço, P. B., & Machado, J. S. (2014). *Testing and modeling of a traditional timber mortise and tenon joint*. Materials and structures, 47(1-2), 213-225.
- Freitas, V. (2012). *Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos*. Ordem dos Engenheiros da Região Norte, Porto.
- Gabarda, B. (2011). *Madera estructural: tipología y cálculo de unione*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- Hirst, E., Brett, A., Thomson, A., Walker, P., Harris, R. (2008). *The structural performance of traditional oak tension and scarf joints*, 10th World Conference on Timber Engineering. University of Bath, Miyazaki, Japan.
- ICOMOS (2002). *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural Do Património Arquitectónico*. International Council on Monuments and Sites
- Itani, R. Y., Faherty, K. F. (1983). *Structural wood research: state-of-the-art and research needs*. ASCE.
- Jankowski, L., Engel, L. J., & Jasieńko, J. (2005). *Praca statyczna wybranych połączeń występujących w drewnianych obiektach historycznych*. Wiadomości Konserwatorskie.
- Judd, J. P., Fonseca, F. S., Walker, C. R., Thorley, P. R. (2011). *Tensile strength of varied-angle mortise and tenon connections in timber frames*. Journal of Structural Engineering, 138(5), pp. 636-644.

Lathuillière, D., Bléron, L., Descamps, T., Bocquet, J. F. (2015). *Reinforcement of dowel type connections*. Construction and Building Materials, 97, pp. 48-54.

LegnoDOC : Servizi Integrati Per Il Consolidamento Delle Strutture Lignee. Disponível em: <http://www.legnodoc.com/download/servizi%20integrati.pdf>

Kasal, B., Tannert, T. (2011). *In Situ Assessment of Structural Timber: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST*, RILEM State of the Art Reports (7).

Koch, H., Eisenhut, L., Seim, W. (2013). *Multi-mode failure of form-fitting timber connections—Experimental and numerical studies on the tapered tenon joint*. Engineering Structures, 48, pp. 727-738.

Kuklík, P. (2008). *Timber Structures Handbook. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures*. Leonardo da Vinci Pilot Projects.

Lourenço, P. B., Branco, J. M. (2012). *Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI*. História da Construção: Arquiteturas e Técnicas Construtivas, p.199-211.

Mascarenhas J. (2004). *Sistemas de Construção – V. O Edifício de Rendimento da Baixa Pombalina de Lisboa*. 2nd ed. Lisboa: Livros Horizonte, pp. 302.

Martitegui, Francisco, et al. (2013a). *Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera: Documento de aplicación del CTE*. Madrid : Maderia, Construcción. ISBN: 978-84-695-3438-0, p. 36.

Martitegui, F.A., et al. (2013b). *Uniones en estructuras de madera: Documento de aplicación del CTE*. Capítulo 4. Confemadera Hábitat, Madrid.

Montero, L. (1990). *Apuntes sobre Tecnología de la madera*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Zamora, p. 268.

NEN-EN 1995-1-1 (2013), NEN Dutch NA 8.11 Ambachtelijke verbindingen, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, pp. 12-16.

NEN 3852 (1973): NEN, Dutch Standards Institution, Delft, The Netherlands.

NEN 6760 (2005): NEN, Dutch Standards Institution, Delft, The Netherlands.

NP EN 350-2 (2001): Durabilidade da Madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural de madeira maciça. Parte 2: Guia da durabilidade natural da madeira e da impregnabilidade de espécies de madeira seleccionadas pela sua importância na Europa.

Pala, H. (2007). *Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira*. Construção Magazine, Publindústria, pp. 54-62.

Palma, P., Cruz, H. (2006). *Comportamento de ligações tradicionais em estruturas de madeira*. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa.

- Palma, P., Cruz, H. (2007). *Mechanical behaviour of traditional timber carpentry joints in service conditions-results of monotonic tests*. In From material to Structure–Mechanical behaviour and failures of the timber structures XVI international symposium, Venice, Italy. ICOMOS IWC.
- Parisi, M. A., Piazza, M. (2000). *Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections*. Journal of Structural Engineering, 126(12), 1395-1403.
- Parisi, M. A., Piazza, M. (2002). *Traditional timber joints in seismic areas: cyclic behavior, numerical modelling, normative requirements*. European earthquake engineering, 16(1): 40-49.
- Parisi, M. A., Piazza, M. (2008). *Seismic strengthening of traditional carpentry joints*. Proceedings, 14th Conference of Earthquake Engineering, Beijing.
- Pereira, S. (2009). *Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Piazza, M., Candelpergher, L. (2001). *Mechanics of traditional connections with metal devices in timber roof structures*. Proceedings of the 7th international conference STREMAH, Bologna, Italy, pp.415-424.
- Piazza, M., Riggio, M. (2007). *Typological and structural authenticity in reconstruction: The timber roofs of Church of the Pieve in Cavalese*. International Journal of Architectural Heritage, Italy, 1(1): 60-81.
- Pierce, P. C., Brungraber, R. L., Lichtenstein, A., Sabol, S., Morrell, J. J., Lebow, S. T. (2005). *Covered bridge manual*. FHWA-HRT-04-098, Federal Highway Administration, McLean, Virginia.
- Pinto, L. (2008). *Inventory of repair and strengthening methods timber*. Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Construction, Politècnica da Catalunya.
- Poletti, E. (2013). *Characterization of the seismic behaviour of traditional timber frame walls*. Doctoral dissertation, PhD thesis, University of Minho, Portugal.
- Poletti, E., Vasconcelos, G., Branco, J. M., Koukouviki, A. M. (2014). *Mechanical characterization of traditional timber connections: experimental results*. 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Universidade de Aveiro.
- Reis, M., Branco, F. G., Mascarenhas, J. M. (2008). *Técnicas de reabilitação em estruturas de madeira*. DISEGNARECON, 1(2).
- Ritter, M. A. (1990). *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance*. EM 7700-8. USDA Forest Service, Washington, D. C.
- Ross, P. (2002). *Appraisal and repair of timber structures*. Thomas Telford, London, ISBN 0-7277-2051-1. p.304.

Shanks, J. D., & Walker, P. (2005). *Experimental performance of mortice and tenon connections in green oak*. *Structural Engineer*, 83(17): 40-45.

SIA 265 (2012): SCIA, Swiss Standardisation Institute, Zürich, Switzerland.

Snow, M., Asiz, A., Chen, Z., Chui, Y. H. (2006). *North American practices for connections in wood construction*. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 8(2): 39-48.

Sobon, J. A. (2002). *Historic American timber joinery*. Timber Framers Guild, Becket, MA, pp.54

TomSing, L. B. (1990). *Manual de Carpinteria (Carpentry Manual)*. Instituto Nacional para la Educacion de los Adultos, Mexico City. ISBN-968-29-0039-5, pp.80.

[1]http://www.costfp1101.eu/images/TS%20mons/Carpentry%20Joints_Thierry%20Descamps.pdf (accedido a 12/07/2015)

[2]http://www.costfp1101.eu/images/TS%20Guimaraes/2nd%20day/Sobra_Dovetail.pdf (accedido a 08/08/2015)

[3]http://www.infomadera.net/uploads/descargas/archivo_8_Libro%20Casas%20de%20Madera%20Medios%20de%20uni%C3%B3n.pdf (accedido a 20/05/2015)

