

Dimensionamento de Estruturas em Madeira

Metodologia e disposições regulamentares relativamente a ligações

Ricardo da Silva Martins Oliveira Hilário

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Júri

Presidente: Prof. Fernando Manuel Fernandes Simões

Orientadores: Prof. Eduardo Manuel Baptista Ribeiro Pereira

Prof. Luís Manuel Coelho Guerreiro

Vogais: Prof. António Manuel Candeias de Sousa Gago

Prof. Augusto Martins Gomes

Outubro 2013

RESUMO

Este trabalho faz o estado da arte do dimensionamento de estruturas de madeira com ênfase nas metodologias de análise e na avaliação da regulamentação actual relativa a ligações. A regulamentação actual encontra-se no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1), sendo esse por isso o documento base deste trabalho.

O Eurocódigo 5 – *Design of timber structures* é relativo ao dimensionamento de estruturas de madeira. Os Eurocódigos foram criados com o objectivo de utilização das mesmas regras de dimensionamento de estruturas em toda a União Europeia. A Parte 1-1: *Common rules and rules for buildings* do Eurocódigo 5 apresenta as regras gerais de dimensionamento de edifícios de madeira, fazendo também parte do documento as regras de dimensionamento de ligações.

O trabalho apresenta uma breve descrição sobre a madeira como material atendendo às suas propriedades e características. São abordados os diferentes tipos de ligações em madeira: as ligações tradicionais, as ligações com cola e as ligações com conectores metálicos. Para o dimensionamento de ligações com conectores metálicos do tipo cavilha é usada a metodologia apresentada no Eurocódigo 5.

Ao longo do trabalho são apresentados exemplos através de comparações e gráficos comentados. Estes exemplos ilustram o funcionamento e a capacidade resistente de certas ligações em madeira.

Palavras-chave:

Estruturas de madeira, Eurocódigo 5, ligações tradicionais, ligações com cola, ligações com elementos metálicos

ABSTRACT

This study consists in determining the state of the art for design of timber structures, with emphasis on the analysis methods and the evaluation of current regulations regarding timber joints. To do so, the Eurocode 5 (EN 1995-1-1) is used.

Eurocode 5 – *Design of timber structures* regulates the design of timber structures. The Eurocode documents aim for the same structural design criteria in the entire European Union. Part 1-1: *Common rules and rules for buildings* of Eurocode 5 presents the general rules of structural design of timber buildings, including the design of timber joints.

This study presents a small description of the properties and characteristics of wood and timber. The different kinds of timber joints are presented: traditional joints, glued joints and dowelled joints. It is used the methodology presented in Eurocode 5 for the design of dowelled joints.

Throughout the study, examples are shown by comparisons and commented graphics. These examples describe how timber joints work and their resistant capacity.

Keywords:

Timber structures, Eurocode 5, traditional joint, glued joint, dowelled joint

AGRADECIMENTOS

Um profundo agradecimento a todos aqueles que através da sua contribuição tornaram a concretização deste trabalho possível.

Ao professor Eduardo Pereira pela oportunidade de realizar este trabalho e pelas linhas orientadoras essenciais para a execução do mesmo.

Ao professor Luís Guerreiro pela disponibilidade e prontidão, e pelas críticas e sugestões que permitiram tornar este trabalho mais interessante.

Ao professor Reza Haghani Dogaheh pelo esclarecimento de dúvidas durante a minha estadia na Suécia.

Ao professor Robert Kliger pela bibliografia fornecida de grande importância na realização deste trabalho.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 – Objectivos	1
1.2 – Organização	2
Capítulo 2 – Madeira	3
2.1 – Madeira como material	4
2.1.1 – Orgânico	4
2.1.2 – Compósito	4
2.2 – Estrutura da madeira	5
2.2.1 – Defeitos	6
2.3 – Propriedades físicas da madeira	7
2.4 – Propriedades mecânicas da madeira	10
2.4.1 – Tracção paralela ao fio	12
2.4.2 – Tracção perpendicular ao fio	13
2.4.3 – Compressão paralela ao fio	13
2.4.4 – Compressão perpendicular ao fio	14
2.4.5 – Resistência da madeira a um ângulo com o fio	14
2.4.6 – Corte	15
2.5 – Factores que influenciam a capacidade resistente da madeira	15
Capítulo 3 – Ligações	18
3.1 – Dimensionamento de ligações	18
3.2 – Ligações tradicionais	19
3.3 – Ligações com cola	19
3.3.1 – Ligações de entalhes cruzados e em bisel	23
3.4 – Conectores metálicos	26
Capítulo 4 – Dimensionamento de ligações com conectores do tipo cavilha	29
4.1 – Parâmetros da ligação	29
4.1.1 – Capacidade resistente da madeira	29
4.1.2 – Momento de plastificação dos conectores	31
4.1.3 – Força de ancoragem	32
4.2 – Capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira	34
4.3 – Capacidade resistente de uma ligação aço-madeira	39
4.4 – Expressões e modos de rotura de acordo com o Eurocódigo 5	42
4.5 – Ligações com múltiplos conectores	50
4.5.1 – Espaçamentos mínimos	50
4.5.2 – Efeito de grupo	52

4.5.3 – Rotura em grupo	54
4.6 – Rigidez de uma ligação	56
Capítulo 5 – Conclusões	57
Referências	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Direcções principais de um elemento e amostra de madeira.....	6
Figura 2.2 - Diferentes faces de um nó numa amostra de madeira	7
Figura 2.3 - Esquema do teor em água na madeira	8
Figura 2.4 - Modos de empeno de um elemento de madeira.....	9
Figura 2.5 - Efeito da fluência na madeira	10
Figura 2.6 - Tensões numa amostra de madeira.....	11
Figura 2.7 - Corte na madeira	12
Figura 2.8 - Relação entre a tensão e extensão e modos de rotura para tracção paralela ao fio.....	12
Figura 2.9 - Relação entre a tensão e extensão e modo de rotura para tracção perpendicular ao fio.....	13
Figura 2.10 - Relação entre a tensão e extensão e modo de rotura para compressão paralela ao fio.....	13
Figura 2.11 - Relação entre a tensão e extensão e modo de rotura para compressão perpendicular ao fio	14
Figura 2.12 – Gráfico com a variação da capacidade resistente da madeira	15
Figura 3.1 - Esquema de uma ligação colada.....	20
Figura 3.2 - Deslocamento relativo com tensão constante.....	21
Figura 3.3 - Deslocamento relativo com tensão variável	21
Figura 3.4 - Gráfico com a variação das tensões numa ligação colada.....	22
Figura 3.5 - Modos de rotura de ligações com elementos metálicos e cola	22
Figura 3.6 – Ligação de entalhes cruzados e ligação em bisel.....	23
Figura 3.7 – Ligação de entalhes cruzados	23
Figura 3.8 - Equilíbrio numa ligação em bisel	24
Figura 3.9 - Gráfico com a variação das tensões na cola de uma ligação em bisel	25
Figura 3.10 - Pregos	26
Figura 3.11 - Parafuso	27
Figura 3.12 - Parafuso de porca	27
Figura 3.13 - Cavilha	28
Figura 3.14 - Placas metálicas	28
Figura 4.1 - Furo pré-furado e não pré-furado	30
Figura 4.2 - Gráfico com os momentos de plastificação de parafusos	32
Figura 4.3 - Força de ancoragem.....	32
Figura 4.4 – Ligação entre dois elementos estruturais de madeira.....	35
Figura 4.5 - Modo de rotura.....	35
Figura 4.6 - Modo de rotura.....	36
Figura 4.7 - Modo de rotura.....	37
Figura 4.8 - Modo de rotura.....	38
Figura 4.9 - Ligação entre um elemento estrutural de madeira e aço.....	39
Figura 4.10 - Modo de rotura.....	39
Figura 4.11 - Modo de rotura.....	40
Figura 4.12 - Modo de rotura.....	40
Figura 4.13 - Modo de rotura.....	41
Figura 4.14 - Colapso de uma ligação.....	42
Figura 4.15 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira com um plano de corte para $t_1=50\text{mm}$	43
Figura 4.16 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira com dois planos de corte para $t_1=50\text{mm}$	44

Figura 4.17 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placa espessa com um plano de corte	45
Figura 4.18 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placa fina com um plano de corte	46
Figura 4.19 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placas espessas com dois planos de corte	47
Figura 4.20 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placas finas com dois planos de corte.....	48
Figura 4.21 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira com dois planos de corte...	49
Figura 4.22 – Efeito de grupo	50
Figura 4.23 - Espaçamentos mínimos entre conectores	51
Figura 4.24 - Gráfico com o número efectivo de pregos para diferentes espaçamentos.....	53
Figura 4.25 - Gráfico com o número efectivo de parafusos para diferentes espaçamentos	54
Figura 4.26 - Modos de rotura em grupo	55

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural com diversos usos no campo da engenharia civil, nomeadamente ao nível das estruturas. É proveniente de florestas, e quando bem geridas, é um material que contribui para a redução do dióxido de carbono (através da fotossíntese) na atmosfera durante toda a sua vida útil. A madeira apresenta assim uma pegada ecológica negativa. Por ter uma relação peso-resistência bastante favorável, a madeira é um material que desde a antiguidade foi usado pelo Homem na construção de abrigos.

Contudo, a madeira também apresenta algumas limitações. Devido à existência de defeitos e limitações nas dimensões das secções transversais foram criados produtos derivados da madeira. As características destes materiais permitiram a criação de estruturas de madeira mais arrojadas. No entanto, a criação de novas estruturas só foi possível devido a um desenvolvimento paralelo de novas técnicas de ligação.

As técnicas mais tradicionais para unir dois elementos estruturais de madeira consistiam em esculpir manualmente os elementos e uni-los conjuntamente com um nó dado através de corda ou cabedal. Com a revolução industrial e a descoberta de novos métodos de ligações perdeu-se parte do conhecimento tradicional, o que resultou num método de tentativa e erro para recuperar esse conhecimento.

Com o desenvolvimento de colas de alta resistência e durabilidade, bem como o de conectores metálicos, as mais recentes ligações entre elementos de madeira são mais eficientes. Hoje, são usados conectores metálicos para a maior parte das ligações em estruturas de madeira.

Este trabalho pretende analisar as metodologias de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira apresentadas pelo Eurocódigo. Os Eurocódigos visam o uso das mesmas normas no dimensionamento de estruturas em toda a União Europeia. O Eurocódigo que apresenta as normas de dimensionamento de estruturas de madeira é o Eurocódigo 5.

1.1 – OBJECTIVOS

O objectivo deste trabalho é fazer o estudo das metodologias de análise presente na regulamentação actual relativa a ligações.

Neste trabalho pretende-se clarificar os modelos de dimensionamento propostos pelo Eurocódigo 5 a propósito das ligações em madeira. Para isso, o trabalho começa por fazer uma abordagem ao funcionamento geral da madeira, seguindo para uma explicação teórica do funcionamento da ligação, bem como de todos os intervenientes nesta. São dados exemplos gerais ao longo do trabalho através de comparações e gráficos comentados.

1.2 – ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está dividido em capítulos para melhor consumar os objectivos propostos. Num primeiro capítulo é feita uma introdução ao trabalho conjuntamente com a apresentação dos seus objectivos e sua organização.

No segundo capítulo é feita uma abordagem geral às propriedades e características da madeira. Para tal, o capítulo começa por fazer uma apresentação à madeira como material orgânico e compósito. Para perceber o comportamento da madeira é ainda feita uma caracterização da sua estrutura com pequeno ênfase nos defeitos que esta pode apresentar. As propriedades e características resistentes da madeira são também apontadas. Em relação às suas propriedades fala-se do seu comportamento face à humidade e ao fogo, variações dimensionais, peso volúmico e fluência. Em relação às características resistentes, é referido nesse capítulo como é que a madeira se comporta quando solicitada a diferentes estados de tensão e corte. Para finalizar, é dada uma breve explicação de como o Eurocódigo 5 tem em consideração os vários factores que alteram o comportamento da madeira.

O terceiro capítulo aborda os diferentes tipos de ligação de elementos estruturais de madeira. As ligações tradicionais são abordadas, bem como as ligações coladas. Em relação às ligações coladas é ainda demonstrado como se faz o dimensionamento de ligações de entalhes cruzados e em bisel. É ainda feita uma apresentação dos diferentes tipos de conectores metálicos que podem ser usados numa ligação.

O quarto capítulo foca-se nas ligações em estruturas de madeira com conectores metálicos. Para isso é feita uma introdução à teoria de Johansen e são demonstradas as equações apresentadas pelo Eurocódigo 5 no âmbito do dimensionamento de ligações. São tratadas as ligações entre elementos de madeira, e ligações entre madeira e aço. É ainda abordado o efeito de grupo presente no dimensionamento de uma ligação com vários conectores metálicos e como se pode calcular a rigidez de uma ligação de acordo com o Eurocódigo 5.

No quinto capítulo são expostas as conclusões do trabalho.

Capítulo 2 – MADEIRA

A madeira é um material tradicional, desde há muito tempo utilizado pelo Homem no âmbito da construção civil. No entanto o seu uso não é feito apenas a nível estrutural. Devido às suas características, a madeira é usada em revestimentos para isolamento térmico e acústico. O seu potencial estético faz da madeira um elemento decorativo muitas vezes procurado.

A madeira tem uma capacidade resistente bastante elevada quando comparada ao seu peso. É também um material económico relativamente não só ao preço da madeira, mas também à facilidade de execução, que reduz o tempo de construção das estruturas. O desenvolvimento de ligações mais eficientes, bem como o de novas técnicas que visam facilitar o dimensionamento deste material contribuem para a economia do mesmo.

A escolha da madeira como elemento estrutural não advém unicamente de níveis de resistência. Numa sociedade cada vez mais preocupada com responsabilidades ambientais, a madeira é um material reciclável e o único cuja pegada ecológica é negativa ao longo de toda a sua vida útil. Assim, a madeira retira mais dióxido de carbono da atmosfera do que aquele que liberta. Com esse dióxido de carbono as árvores produzem madeira cujo principal elemento é o carbono.

Dada a sua estrutura, a madeira é um material heterogéneo e anisotrópico. Associado ao seu carácter orgânico, é um material vulnerável a agentes externos como ataques de fungos e insectos. A madeira é ainda dependente da humidade no ambiente em que está inserida, sendo um factor directamente ligado à sua capacidade resistente. Ainda como desvantagem da madeira há o facto de esta ser combustível, apesar de ser um material resistente ao fogo. A madeira como elemento estrutural é um material com um comportamento elástico sem capacidade de criação de rótulas plásticas.

Com a evolução tecnológica foram também criados derivados da madeira permitindo a criação de estruturas mais resistentes. Tirando partido de menores volumes de madeira, os seus derivados apresentam capacidades resistentes superiores às da madeira maciça. São exemplos de derivados da madeira a madeira lamelada colada, a madeira micro lamelada colada, placas de aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas e o contraplacado.

Uma nota final para um aspecto referente à língua portuguesa. No inglês é feita a distinção entre a madeira usada para efeitos estruturais (*timber*) e a madeira como material (*wood*). A definição destes dois termos está relacionado com o volume de madeira. Dada a sua aplicação, a madeira para fins estruturais (*timber*) tem um volume muito maior do que uma amostra de madeira (*wood*).

2.1 – MADEIRA COMO MATERIAL

2.1.1 – ORGÂNICO

Como material orgânico que provém das árvores, a madeira é o principal constituinte de toda a sua estrutura. Mesmo sendo possível aproveitar a madeira proveniente dos ramos da árvore, a maioria do material provém do tronco. O tronco é o principal responsável pela capacidade resistente da árvore a factores externos bem como pelo transporte e armazenamento de nutrientes necessários à sua sobrevivência. As diferenças existentes entre as diversas espécies de árvores não alteram consideravelmente a qualidade da madeira.

As árvores podem ser essencialmente resinosas ou folhosas. As árvores resinosas apresentam uma estrutura celular mais simples. Têm um crescimento mais rápido do que as folhosas, que resulta num peso volúmico mais baixo associado a uma capacidade resistente reduzida. O rápido crescimento não só permite a utilização de elementos com maiores dimensões, como também uma maior reposição no mercado. As árvores folhosas têm associado ao crescimento mais lento um maior peso volúmico e capacidade resistente. As dificuldades de secagem e de trabalho, bem como a complexidade estrutural fazem da madeira proveniente de árvores folhosas mais usada em termos decorativos. Como exemplos de árvores resinosas tem-se o pinheiro e, de árvores folhosas, o eucalipto.

Como substância orgânica, a madeira é constituída elementarmente por carbono (cerca de 50% da estrutura molecular), hidrogénio (cerca de 6%) e oxigénio (aproximadamente 44%). As células que maioritariamente constituem a madeira são a celulose (40% a 45%) e a lenhina (25% a 30%).

2.1.2 – COMPÓSITO

A madeira é um material compósito constituído por fibras de celulose orientadas segundo uma direcção preferencial (direcção do fio) inseridas numa matriz de lenho. O carácter natural da madeira faz com que a existência de defeitos seja aleatória, não sendo possível determinar sem um estudo prévio a capacidade resistente de certo elemento de madeira.

A capacidade resistente da madeira está ligada à existência de defeitos nas fibras. A probabilidade de existência desses defeitos é tanto menor quanto menor for o volume em estudo. A teoria Weibull, ou a lei do elo mais fraco, diz que uma corrente sujeita à tracção não é mais forte que o seu elemento mais fraco. Assumindo que o material é frágil e que o tamanho e distribuição de defeitos no material é aleatória Weibull desenvolveu uma equação (Equação 2.1) que relaciona o volume com a capacidade resistente de duas amostras diferentes do mesmo material. Nessa equação, f_1 e f_2 representam a capacidade resistente da amostra 1 e da amostra 2 respectivamente, V_1 e V_2 representam o volume dessas mesmas amostras 1 e 2 respectivamente e k é um parâmetro de forma dependente da medição de resistência do material.

$$\frac{f_2}{f_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1/k} \quad (2.1)$$

A existência de defeitos numa fibra está relacionada com o comprimento e diâmetro dessa fibra. Quanto menor o diâmetro da fibra, menor a probabilidade de existência de defeitos. No limite, pode-se considerar uma fibra como uma corrente de moléculas onde ao primeiro defeito tem-se duas fibras.

Dada a diferença de volumes existente entre a madeira para fins estruturais e a uma amostra de madeira, é possível assumir que a primeira apresenta muito menor capacidade resistente que a segunda. Esta característica é facilmente perceptível quando falamos da capacidade resistente da madeira para fins estruturais à tracção e à compressão.

Numa amostra de madeira, a resistência à tração é maior do que à compressão na direcção do fio. A existência de defeitos na madeira para fins estruturais dá valores mais elevados de resistência à compressão do que à tracção nessa direcção. Ao avançar nas classes da madeira maciça, constata-se que esta diferença é cada vez mais atenuada, resultante de um maior controlo de qualidade do lote.

A classe da madeira é diferente de acordo com o tipo, quantidade e distribuição de defeitos que apresenta. O valor característico da capacidade resistente da madeira maciça à flexão dá o nome à classe. Por exemplo, um elemento de madeira de classe C30 tem uma capacidade resistente à flexão de 30MPa.

2.2 – ESTRUTURA DA MADEIRA

O aproveitamento da madeira é feito essencialmente ao nível do tronco. São as células mortas as que apresentam melhores características resistentes. A capacidade resistente destas células provém da parede celular (característica das células vegetais) composta por celulose reforçada com lenhina.

No entanto, nem todas as células do tronco estão mortas. Para o crescimento da árvore, existem células com uma função bem definida nos vários processos do seu metabolismo. Para os efeitos pretendidos ao nível da engenharia civil, as células vivas não são as mais indicadas devido à sua baixa resistência mecânica. São as células existentes no interior do tronco (cerne) que apresentam uma melhor capacidade resistente.

O cerne é a principal causa da resistência mecânica de uma árvore. Este é dificilmente atacado uma vez que as suas células constituintes estão mortas. As células constituintes do cerne resultam da paragem do transporte de nutrientes e do depósito de resíduos. No borne (envolvente do cerne) encontram-se as células vivas da madeira responsáveis pelo seu metabolismo. A madeira dessa zona é mais sensível a ataques de insectos e fungos, e tem menor capacidade resistente quando solicitada. O cerne e o borne juntos constituem o lenho e a sua diferença é unicamente em composição química. O tamanho, formato e número de células não varia na passagem de borne para cerne.

Devido às diferentes estações do ano, são visíveis anéis de crescimento num corte transversal da árvore. Estes anéis são criados por novas células de madeira produzidas no câmbio. Durante a Primavera, o rápido crescimento das células faz com que estas apresentem paredes celulares mais finas formando um anel mais claro e largo. No Outono, o crescimento dessas células é mais moroso, fazendo com que as novas células apresentem paredes celulares mais espessas. Este anel é então mais denso e estreito que o primeiro, daí a sua cor mais escura. Esta característica permite estimar a idade da árvore.

Um elemento de madeira apresenta três direcções predominantes: longitudinal, tangencial e radial. A direcção longitudinal é a orientação predominante das células constituintes da madeira, sendo por isso designada como a direcção do fio. A direcção tangencial e radial é considerada em relação aos anéis de crescimento. É possível falar de orientação das células da madeira por estas serem alongadas.

A Figura 2.1 representa esquematicamente dois elementos de madeira: uma parte do tronco de uma árvore e um elemento de madeira cortado desse mesmo tronco. Para cada um destes elementos, o sistema de coordenadas usado é diferente. No caso do tronco, o sistema de coordenadas é local estando directamente relacionado com as direcções principais da orientação da madeira: direcção longitudinal (l), direcção tangencial (t) e direcção radial (r). O elemento estrutural de madeira pode apresentar um sistema de coordenadas mais simples onde cada direcção coincide com os lados do elemento. Na mesma figura é também possível observar os anéis de crescimento da árvore.

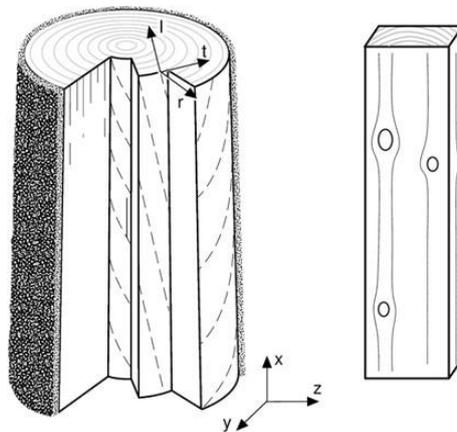


Figura 2.1 - Direcções principais de um elemento e amostra de madeira [Olsson et al, 2013]

2.2.1 – DEFEITOS

O principal defeito que um elemento de madeira pode apresentar é o nó. O nó é a base de um novo ramo inserido no tronco, partindo da medula. Tem uma forma aproximada cónica cuja direcção do fio costuma ser perpendicular à do tronco. Os nós, para efeitos decorativos, não apresentam qualquer problema, sendo muitas vezes valorizados. O mesmo já não acontece quando a madeira é usada para fins estruturais. A interrupção do fio pelo nó é uma zona enfraquecida do elemento de madeira. Em termos de classificação estrutural da madeira, existem limites impostos à percentagem de secção transversal da peça que os nós ocupam.

A Figura 2.2 apresenta quatro lados de uma amostra de madeira afectada pela existência de um nó. As faces cujas normais coincidem com a direcção do fio não aparecem.



Figura 2.2 - Diferentes faces de um nó numa amostra de madeira [Oscarsson et al, 2010]

A madeira é também um material cujas fendas constituem um problema. As variações de volume ou a má aplicação de cargas na madeira podem provocar fendas que, por criarem descontinuidades, enfraquecem o material. Quando a madeira retrai (maioritariamente devido à humidade), as fendas que se desenvolvem tendem a partir do tronco para a medula, desenvolvendo-se na direcção do fio. O aumento de volume não constitui um problema para o desenvolvimento de fendas. Pode ainda acontecer que devido a elevadas forças aplicadas na árvore durante o seu crescimento se criem fendas anelares, ou seja, que os anéis de crescimento se afastem formando uma fenda circular.

O fio inclinado é quando o eixo longitudinal da peça e a direcção do fio não coincidem. Este defeito pode ser resultado de mau corte das peças ou de anomalias de crescimento da árvore como a curvatura do tronco. A desvantagem do fio inclinado surge na aplicação de cargas, em que, devido à anisotropia do material, pode haver esforços elevados perpendiculares ao fio.

2.3 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

A humidade é o factor externo com maior influência no comportamento da madeira, estando directamente relacionado com a quantidade de água que existe nas células que constituem o material. Por ser um material higroscópico a madeira realiza trocas de águas com o exterior até atingir um equilíbrio entre os dois meios.

Como material orgânico, a madeira possui alguma água na sua constituição. Essa água de constituição não pode ser libertada sem a destruição do material. Com a acumulação de água, variações dimensionais ocorrem no material. A água de impregnação é acumulada ao nível das paredes celulares que incham consoante a quantidade de água absorvida. Quando as paredes celulares não conseguem absorver mais água, é atingido o ponto de saturação das fibras (este ponto é atingido com uma percentagem de teor em água entre os 27% e os 33%). Toda a água que é absorvida pelo material, a partir desse ponto, é acumulado nos espaços vazios da estrutura alveolar da madeira como água livre.

O teor em água (u) da madeira pode ser calculado através da comparação da massa da madeira húmida (m_u) com a massa da madeira quando sujeita a um processo de secagem a 103°C durante 24h (m_d). O resultado é assim um valor percentual como apresentado na Equação 2.2.

$$u = \frac{m_u - m_d}{m_d} \quad (2.2)$$

A Figura 2.3 representa o comportamento esquemático das células da madeira quando sujeitas a diferentes percentagens de humidade. Quando a madeira apresenta um teor em água inferior ao ponto de saturação das fibras, esta é representada como demonstrado na parte a) da figura 2.4. A madeira com um teor em água aproximadamente igual ao ponto de saturação das fibras é representada na parte b) e a madeira com um teor em água superior ao ponto de saturação das fibras na parte c).

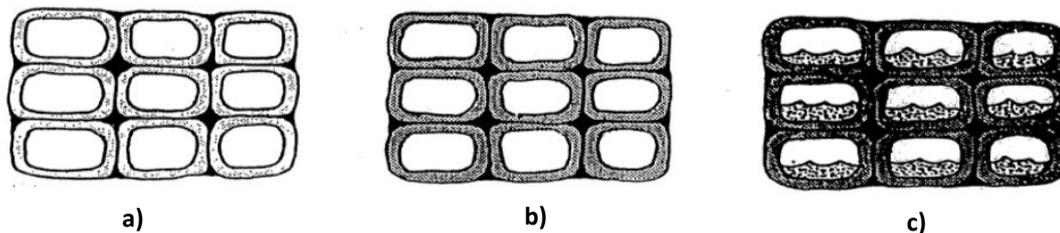


Figura 2.3 - Esquema do teor em água na madeira [Kliger, 2013]

O excesso de humidade no material influencia a capacidade resistente da madeira. Com o aumento do teor em água, apresenta um pior comportamento quando solicitada à compressão. O comportamento da madeira à tracção é muito semelhante com diferentes teores em água no material. A humidade influencia também a deformação que o material sofre quando sujeito a uma carga. Os ciclos de absorção e libertação de água resultam num aumento da deformação podendo levar o material à rotura antes de atingir a carga máxima.

A anisotropia da madeira resulta de uma orientação preferencial e alongamento das células constituintes, bem como na simetria axial do material. Esta anisotropia reflecte-se em diferentes variações dimensionais quando submetida a acumulação ou libertação de água no material. As variações de volume a nível longitudinal são muito pequenas, sendo apenas tidas em conta para grandes comprimentos de madeira. Em relação às variações de volume tangencial e radial, estas já são significativas e necessárias ter em atenção. As variações de volume a nível tangencial são sensivelmente o dobro das variações a nível radial.

As variações dimensionais causadas pela acumulação de água no material levam a empenos na madeira, dificultando a sua utilização. Os possíveis tipos de empeno são: o empeno em arco de canto, o empeno em arco de face, o empeno em meia cana e o empeno em hélice. Os empenos em arco de canto e de face são criados por variações volumétricas longitudinais conjugadas com a libertação de tensões a que o elemento estrutural estava sujeito. O empeno em meia cana é criado devido a diferentes retracções a nível radial e tangencial quando combinados com a forma dos anéis de crescimento da árvore. O empeno em hélice está relacionado com a retracção do elemento. Num elemento estrutural com o fio inclinado, ao dar-se uma retracção perpendicular ao fio muito elevada, cada anel de crescimento empena. O empenamento dos anéis de crescimento leva ao empenamento em hélice do elemento. Os vários tipos de empeno estão representados na Figura 2.4.

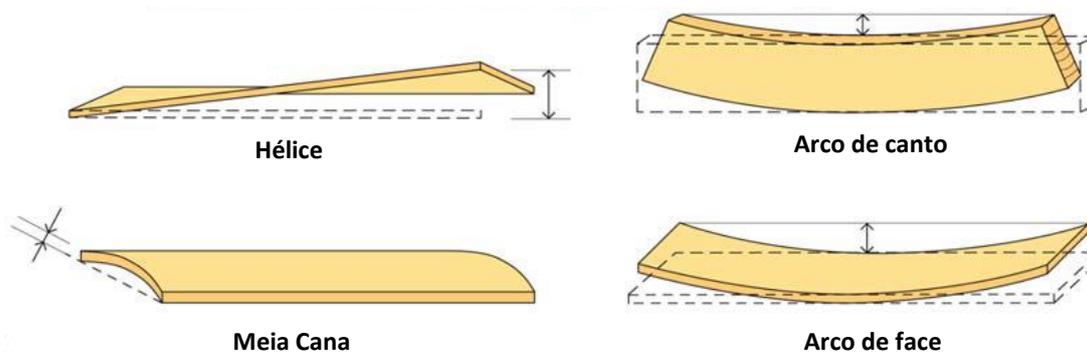


Figura 2.4 - Modos de empeno de um elemento de madeira [adaptado de Crocetti et al, 2011]

Embora a madeira apresente grandes variações de volume devidas à humidade, o mesmo não acontece relativamente à temperatura. O caso do aço é o contrário: existem grandes variações dimensionais devidas à temperatura mas não devidas à humidade.

A madeira, por ser um material combustível, é consumida pelo fogo no caso de um incêndio. No entanto, a sua resistência ao fogo é bastante elevada se a estrutura for dimensionada para tal. O fogo ao consumir a madeira carboniza a mesma, deixando uma camada de carvão envolvendo uma secção interna intacta do elemento estrutural. Por o carvão ser um isolante térmico superior ao da madeira (que por si só já é elevado) a temperatura da secção interna do elemento estrutural mantém-se baixa. Dimensiona-se assim, uma secção interna resistente aos esforços impostos à estrutura.

É possível aferir qual a área do elemento estrutural que fica carbonizada tendo em conta o tempo de progressão da carbonização da madeira. Assim, a capacidade resistente ao fogo de um elemento de madeira é dependente da relação perímetro-área, pelo que grandes secções apresentam uma melhor resistência ao fogo que menores secções.

Uma vez que por baixo da faixa carbonizada a secção estrutural apresenta as suas propriedades praticamente inalteradas, a estrutura continua a desempenhar as suas funções. Tendo uma estimativa da área carbonizada e sabendo qual a secção resistente necessária partindo das regras de dimensionamento estrutural, é possível dimensionar uma estrutura de madeira para resistir a fogos. Não podem no entanto, ser deixados de parte elementos de segurança como protecção da madeira contra fogos, protecção das ligações e a existência de extintores na estrutura em funcionamento. Em comparação com estruturas de aço, a madeira poderá assim ter um melhor comportamento face a um incêndio quando bem dimensionada.

O peso volúmico da madeira é um elemento importante no dimensionamento de estruturas, nomeadamente ao nível das ligações. Os valores de peso volúmico necessários para o dimensionamento de estruturas de madeira são o valor característica correspondente ao percentil de 5% (ρ_k) e o valor médio correspondente ao percentil de 50% (ρ_{mean}) de uma distribuição de probabilidade normal do tipo de madeira em estudo.

A madeira é ainda um material que, quando sujeita a uma carga durante um longo período de tempo, apresenta um aumento de deformação. Assim, a fluência é uma característica da madeira. Quando uma carga é aplicada existe uma deformação instantânea. A duração da carga ao longo do tempo leva a um acréscimo progressivo de deformação à deformação instantânea. Quando a carga é retirada existe outra deformação instantânea. No entanto, ao longo do tempo vai-se verificando um decréscimo dessa deformação, nunca atingido a deformação inicial nula. Por existir assim uma deformação permanente constante após a retirada da carga, esta tem de ser tida em consideração no dimensionamento da madeira. A Figura 2.5 representa essa variação da flecha de uma viga quando uma carga é aplicada (em t_i) e retirada após um longo período de tempo (em t_f).

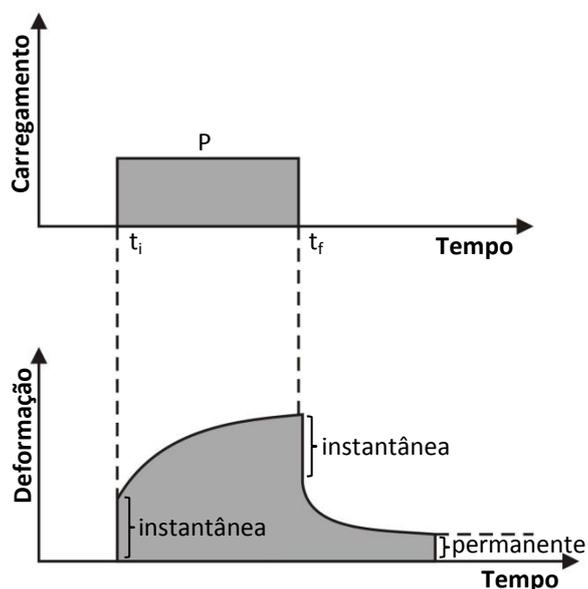


Figura 2.5 - Efeito da fluência na madeira [adaptado de Kliger, 2013]

O Eurocódigo 5 considera um factor k_{def} para ter em conta a fluência no cálculo da flecha de uma viga. Esse factor é diferente entre derivados da madeira e está directamente ligado às condições em que o elemento estrutural está exposto.

2.4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A anisotropia da madeira, para além de causar problemas devidos a diferentes variações dimensionais, também dá origem a diferentes comportamentos mecânicos consoante cada uma das direcções do elemento. Sendo diferente a capacidade resistente do material em cada direcção, é importante perceber como é que a carga é aplicada numa estrutura de madeira. A capacidade resistente da madeira é frequentemente caracterizada em função da direcção do fio. Designam-se por tensões paralelas ao fio, as tensões que fazem um ângulo de 0° com a direcção do fio. As tensões perpendiculares ao fio fazem um ângulo de 90° com a direcção do fio. Qualquer ângulo de aplicação da força é dado sempre assim, em função da direcção do fio.

Como representado na Figura 2.6, cada tensão (normal ou de corte) que actua numa faceta de um elemento infinitesimal de madeira tem de ser definido de acordo com a sua direcção: longitudinal (L), tangencial (T) ou radial (R). Existem assim tensões normais na direcção longitudinal (σ_L), tangencial (σ_T) e radial (σ_R) bem como tensões de corte que actuam segundo a direcção longitudinal-tangencial (τ_{LT}), longitudinal-radial (τ_{LR}) e radial-tangencial (τ_{RT}).

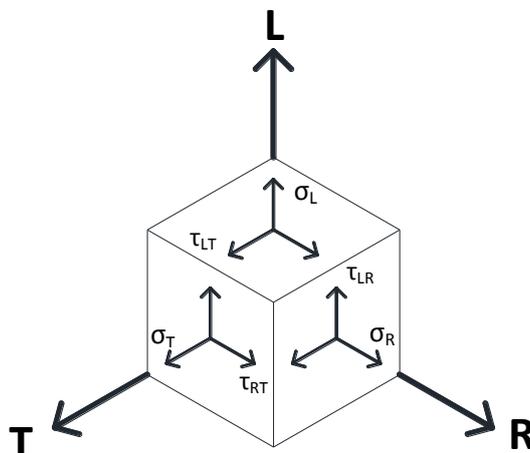


Figura 2.6 - Tensões numa amostra de madeira

As diferentes direcções apresentam também diferentes módulos de elasticidade, de distorção e coeficientes de Poisson na madeira. No entanto, as diferenças entre a direcção radial e tangencial são muito pequenas, pelo que apenas são considerados estes módulos na direcção paralela e perpendicular ao fio. O módulo de elasticidade perpendicular ao fio é ainda mais elevado no cerne do que no borne. Devido à reduzida diferença, o mesmo módulo de elasticidade é usado no dimensionamento de estruturas de madeira.

As características da madeira maciça necessárias para o dimensionamento de estruturas de madeira persentes no Eurocódigo 5 são as seguintes: a capacidade resistente à flexão, a capacidade resistente à compressão e tracção paralela e perpendicular ao fio, à capacidade resistente ao corte com uma componente paralela à direcção do fio, o valor característico do módulo de elasticidade, o valor médio do módulo de elasticidade paralelo e perpendicular ao fio, o valor médio do módulo de distorção e os valores característico e médio do peso volúmico.

O valor característico do módulo de elasticidade é referente ao percentil de 5% de uma distribuição de probabilidade normal do tipo de madeira em estudo e os valores médios dos módulos de elasticidade e distorção são referentes ao percentil de 50%. O valor característico do módulo de elasticidade é usado no cálculo de deformadas e o valor médio do módulo de elasticidade no cálculo de esforços.

Para outros derivados da madeira o Eurocódigo 5 omite ou adiciona novos elementos. Por exemplo, para o caso da madeira lamelada colada o Eurocódigo 5 acrescenta os seguintes dados: a capacidade resistente ao corte com ambas as componentes perpendiculares ao fio e o valor característico do módulo de elasticidade paralelo e perpendicular ao fio.

A Figura 2.7 apresenta a diferença entre o corte com uma componente paralela à direcção do fio (parte a)) e com ambas as componentes perpendiculares à direcção do fio (parte b)).

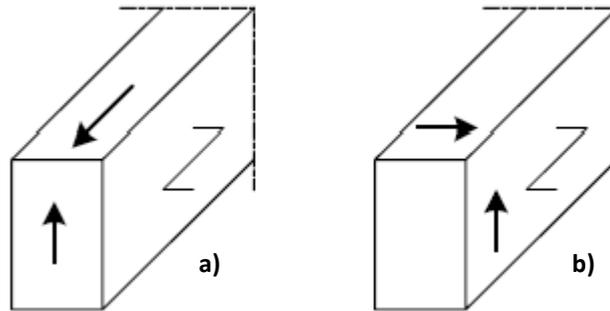


Figura 2.7 - Corte na madeira [Eurocódigo 5, 2004]

2.4.1 – TRACÇÃO PARALELA AO FIO

O comportamento da madeira quando sujeita a tracção paralela ao fio ($f_{t,0}$) pode ser considerado linear, sendo o seu modo de rotura frequentemente frágil e na ordem dos 100MPa. A rotura da madeira irá ocorrer a nível celular através da separação das células constituintes do material ou através de uma rotura ao nível das paredes celulares. Ao considerarmos uma amostra de madeira, esta é a capacidade resistente mais elevada do material.

A Figura 2.8 apresenta a relação entre a tensão e extensão da madeira quando sujeita a tracção paralela ao fio (parte a)). A parte b) e c) da mesma figura representam respectivamente a rotura a nível do material no caso de separação das células da madeira e no caso em que se dá a rotura das mesmas células.

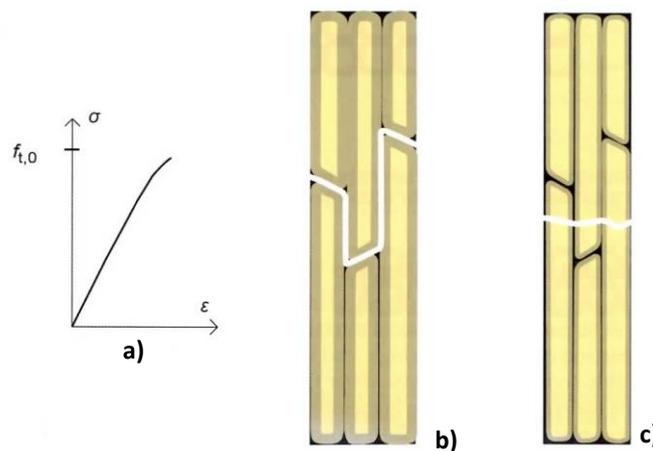


Figura 2.8 - Relação entre a tensão e extensão e modos de rotura para tracção paralela ao fio [adaptado de Crocetti et al, 2011]

2.4.2 – TRACÇÃO PERPENDICULAR AO FIO

A capacidade resistente da madeira quando sujeita a tracção perpendicular ao fio ($f_{t,90}$) é muito baixa, sendo esta a menor das suas capacidades resistentes. A capacidade resistente da madeira nesta direcção está na ordem dos 0,5MPa. Esta capacidade resistente é bastante influenciada pela existência de fendas no material.

A Figura 2.9 apresenta a relação entre a tensão e extensão na madeira quando sujeita a tracção perpendicular ao fio (parte a) e o modo de rotura a nível do material (parte b)).

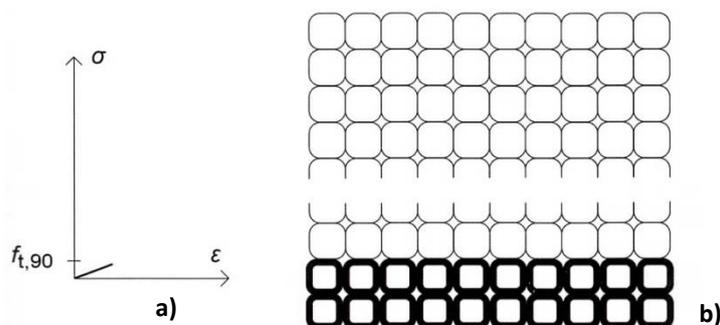


Figura 2.9 - Relação entre a tensão e extensão e modo de rotura para tracção perpendicular ao fio [adaptado de Crocetti et al, 2011]

2.4.3 – COMPRESSÃO PARALELA AO FIO

Um elemento de madeira quando solicitado à compressão paralela ao fio ($f_{c,0}$) consegue suportar tensões na ordem dos 80MPa. Porque a compressão é paralela às fibras de madeira, quando a carga é demasiado elevada as fibras encurvam. A encurvadura das fibras faz com que um elemento de madeira deixe de suportar uma carga tão elevada, havendo um abaixamento da tensão para extensões muito elevadas até à rotura. Para madeiras que servem de elemento estrutural, esta é a capacidade resistente mais elevada.

A Figura 2.10 apresenta a relação entre a tensão e extensão na madeira quando sujeita a compressão paralela ao fio (parte a) e o modo de rotura a nível do material (parte b)).

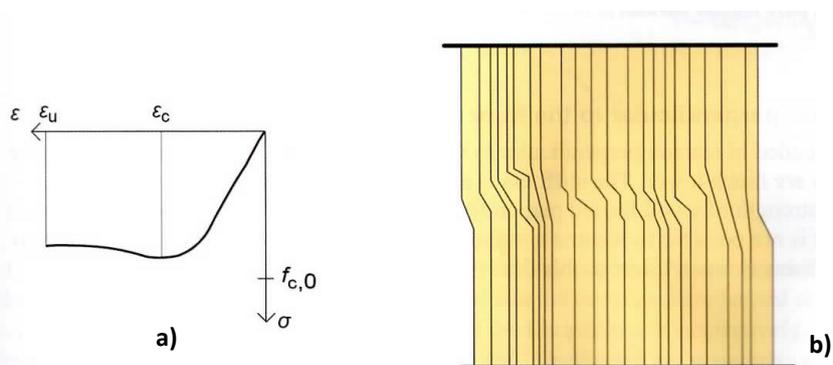


Figura 2.10 - Relação entre a tensão e extensão e modo de rotura para compressão paralela ao fio [adaptado de Crocetti et al, 2011]

2.4.4 – COMPRESSÃO PERPENDICULAR AO FIO

A rotura da madeira por compressão perpendicular ao fio ($f_{c,90}$) é dada pelo esmagamento das paredes celulares das células de madeira. É por isso difícil fornecer valores exactos para a capacidade resistente à compressão perpendicular ao fio da madeira, pois quando todas as células estão esmagadas, esta capacidade resistente volta a aumentar. Definiu-se então que esta capacidade resistente é dependente da deformação: quando a deformação é excessiva, a madeira cede por compressão perpendicular ao fio. O valor desta capacidade resistente está na ordem dos 4MPa.

A Figura 2.11 apresenta a relação entre a tensão e extensão na madeira quando sujeita a compressão perpendicular ao fio (parte a)) e o modo de rotura a nível do material (parte b)).

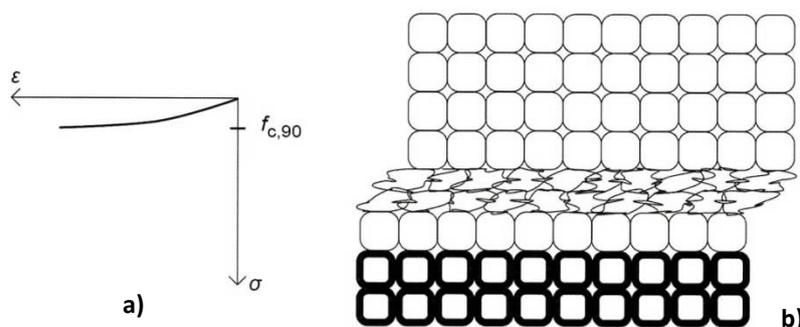


Figura 2.11 - Relação entre a tensão e extensão e modo de rotura para compressão perpendicular ao fio [adaptado de Crocetti et al, 2011]

2.4.5 – RESISTÊNCIA DA MADEIRA A UM ÂNGULO COM O FIO

A madeira tem diferentes registos de comportamento ao trabalhar nas várias direcções, sendo por isso necessário saber a sua capacidade resistente com uma força aplicada a um certo ângulo (α) do fio. A caracterização da resistência da madeira em qualquer direcção (f_α) é obtida conjugando a resistência paralela (f_0) com a perpendicular (f_{90}) ao fio na proporção do ângulo α definido pela direcção em estudo. A equação que caracteriza a resistência da madeira em qualquer direcção foi proposta por Hankinson e é apresentada na Equação 2.3.

$$f_\alpha = \frac{f_0 \times f_{90}}{f_0 \times \sin^2 \alpha + f_{90} \times \cos^2 \alpha} \quad (2.3)$$

A Figura 2.12 apresenta a variação da capacidade resistente da madeira em função do ângulo com a direcção do fio (em graus). Para tal é usada madeira maciça de classe C30 sujeita à compressão. O valor da sua capacidade resistente característica à compressão paralela e perpendicular ao fio é de 23MPa e 2,7MPa respectivamente.

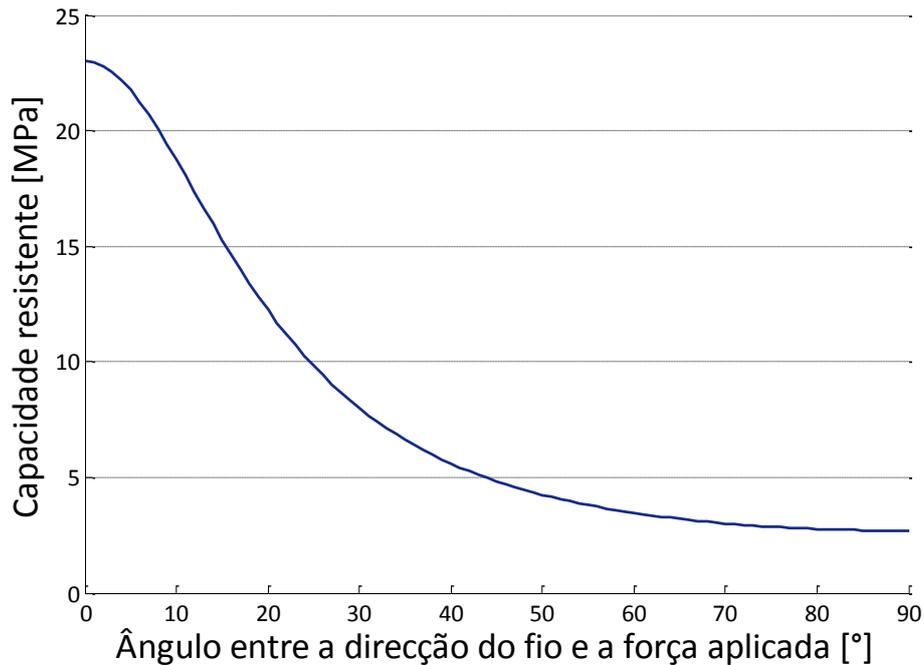


Figura 2.12 – Gráfico com a variação da capacidade resistente da madeira

Este problema resulta num maior cuidado na aplicação das forças no elemento estrutural. O uso de forças com um ângulo em relação ao fio é muitas vezes associado ao defeito do fio inclinado.

2.4.6 – CORTE

A madeira apresenta uma diferente capacidade resistente ao corte consoante a direcção em que este actua. A capacidade resistente ao corte com uma componente paralela ao fio (longitudinal-radial e longitudinal-tangencial) varia entre os 5MPa e os 8MPa. A capacidade resistente ao corte com ambas as componentes perpendiculares ao fio (radial-tangencial) varia entre os 3MPa e os 4MPa. A existência de fendas na madeira influencia a sua capacidade resistente ao corte.

2.5 – FACTORES QUE INFLUENCIAM A CAPACIDADE RESISTENTE DA MADEIRA

A capacidade resistente da madeira, por ser influenciada por diferentes factores, depende de parâmetros que os tenham em conta. Assim, o Eurocódigo 5 considera no seu dimensionamento as diferentes condições e usos que um elemento estrutural pode ter. Como todos os materiais, a capacidade resistente da madeira (f_k) é reduzida através de um factor γ_m que difere para cada tipo de derivados da madeira (no caso de madeira maciça, γ_m tem o valor de 1,3). Para ter em conta os factores que conduzem a diferentes capacidades resistentes é usado o factor k . Existe um factor k para cada possível parâmetro que influencia a capacidade resistente da madeira. A capacidade resistente final da madeira (f_d) é então dada pela seguinte Equação 2.4.

$$f_d = \prod_k \left(\frac{f_k}{\gamma_m} \right) \quad (2.4)$$

O parâmetro mais importante no comportamento do elemento estrutural é considerado através do factor k_{mod} . Este factor tem em conta a variação da humidade e duração da carga no elemento estrutural. Para isso, o Eurocódigo 5 considera três classes de serviço e cinco tempos de aplicação da carga.

As três classes de serviço vão desde a classe 1 onde o elemento estrutural é interior estando protegido de grandes variações de humidade até à classe de serviço 3 em que o elemento estrutural está exposto a factores externos que variam frequentemente. Em qualquer um dos casos, a temperatura de utilização é considerada como sendo de 20°C. Em relação à humidade existente no exterior, a classe 1 considera uma humidade relativa inferior a 65% e a classe 2 uma humidade relativa inferior a 85%. A classe 3 considera os outros casos.

Os cinco tempos de aplicação de carga são a acção permanente cujo tempo de aplicação é superior a 10 anos (como o peso próprio da estrutura), a acção a longo prazo cujo tempo de aplicação varia entre os 6 meses e os 10 anos (como a restante carga permanente), a acção a médio prazo cujo tempo de aplicação varia entre 1 semana e os 6 meses (como a sobrecarga), a acção a curto prazo cujo tempo de aplicação é menor que uma semana (como factores externos, por exemplo o vento) e a acção instantânea.

Os valores de k_{mod} variam muito entre os diferentes derivados da madeira e nunca toma valores iguais à unidade, pelo que tem de ser sempre tido em conta. No entanto, em alguns casos de acções instantâneas em que a classe de serviço é do tipo 1 ou 2, o valor de k_{mod} pode tomar valores superiores à unidade (por exemplo, a madeira maciça em ambos os casos tem o valor de k_{mod} igual a 1,10).

Outro factor k que é tido em conta é devido ao volume de madeira. Se o volume da madeira for pequeno, a sua capacidade resistente pode ser aumentada, devido à menor probabilidade de existência de defeitos. O Eurocódigo 5 considera assim a existência de um k_h . Este factor apenas influencia a capacidade resistente do material quando sujeito a um momento flector ou tracção. No caso de madeira maciça cujo valor característico do peso volúmico é menor que 700kg/m³, o valor de k_h é sempre superior a 1,0 e menor do que 1,3, sendo dado pela Equação 2.5.

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \quad (2.5)$$

Na expressão, h é a altura da secção para a resistência ao momento flector e a largura para a resistência à tracção, aparecendo em mm. Em nenhum dos casos, h pode ser maior que 150mm. Por ser sempre maior ou igual à unidade, este parâmetro pode não ser usado no dimensionamento de uma estrutura de madeira, assumindo assim uma atitude mais conservativa.

Ainda associado ao volume, existe o factor k_{vol} . Este factor está associado a tensões de tracção em vigas de madeira lamelada colada, sendo dependente do factor k_{dis} . O factor k_{dis} serve para redistribuir as tensões no topo de uma viga do mesmo tipo, sendo sempre superior à unidade. O uso destes dois factores é importante nestes casos, pois as vigas de madeira lamelada colada nem sempre são lineares, sendo usadas como elementos curvos, de altura variável ou uma combinação de ambos.

No caso de dimensionamento de ligações em elementos estruturais de madeira, o valor obtido é o valor característico da capacidade resistente da ligação e não o valor de dimensionamento. É por isso necessário utilizar o factor k_{mod} e γ_m para obter o valor de dimensionamento capacidade resistente da ligação. No caso de os elementos na ligação serem diferentes derivados da madeira (material 1 com $k_{mod,1}$ e $\gamma_{m,1}$, e o material 2 com $k_{mod,2}$ e $\gamma_{m,2}$), o γ_m usado deverá ser o maior dos dois materiais. O Eurocódigo 5 considera o valor de k_{mod} dado pela Equação 2.6.

$$k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} \cdot k_{mod,2}} \quad (2.6)$$

Capítulo 3 – LIGAÇÕES

Uma ligação serve para transferir esforços de um elemento estrutural para outro. O dimensionamento de uma ligação requer atenção à limitação de deformações e rotações, à segurança e à sua concretização com um custo razoável. São também relativamente caras e consomem muito tempo quer no seu dimensionamento, quer na concretização da ligação. Um melhor comportamento da estrutura é obtido através da utilização de ligações simples e em menor número.

É também relevante o comportamento das ligações nas estruturas de madeira durante um sismo. É muito difícil criar ligações perfeitamente rígidas ou rotuladas entre elementos de madeira. Uma consequência directa é que existe uma rigidez associada à ligação, que permite alguma rotação e deslocamentos relativos entre elementos ligados. A nível sísmico, esta característica dá origem a alguma dissipação de energia por calor. É assim frequente o uso deste tipo de estruturas em zonas de elevado risco sísmico, como é o caso do Japão.

3.1 – DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES

Quando se dimensiona uma ligação existem alguns factores a ter em conta: as forças actuantes, as repercussões que a ligação vai ter no material, a rigidez do nó, o seu modo de cedência, facilidade de concretização e os factores ambientais (humidade e resistência ao fogo). Para elementos estruturais pequenos e lineares, as placas e pregos costumam ser um bom conector. Em elementos maiores, as forças actuantes também são maiores, pelo que se adequam melhor outros tipos de ligações como os parafusos e as ligações escondidas. Em algumas estruturas usa-se mesmo conectores de madeira. As ligações escondidas contribuem ainda para o aumento da segurança da estrutura, uma vez que a ligação está protegida ao fogo e outros agentes exteriores pelo elemento estrutural.

Em relação às forças actuantes é necessário perceber como é que estas são transmitidas na ligação. O uso de pregos à tracção, por exemplo, não é o mais indicado numa ligação, uma vez que a madeira pode retrair ou dilatar com a humidade. Conjugado com o facto de que estas variações de volume podem causar fendas na madeira, facilmente se dá a rotura de uma ligação pregada por arranque do parafuso. Outro exemplo prende-se com o uso de ligações onde a força é transmitida causando tracções concentradas perpendiculares ao fio na madeira. Uma vez que a capacidade resistente da madeira nesta direcção é muito baixa, é muitas vezes necessário encontrar outra maneira de transmitir a força para o elemento estrutural.

A simplicidade da solução é também um factor importante, uma vez que se traduz num modelo de cálculo mais realista e numa melhor percepção por parte do projectista daquilo que vai acontecer à ligação. A diversidade de ligações em estruturas de madeira garante uma gama de soluções para qualquer problema e desafiam a originalidade do projectista.

Para o dimensionamento de uma ligação é necessário ter em conta a redundância, distribuindo a força numa secção. A humidade da madeira é também importante: as variações de volume da madeira podem inviabilizar uma ligação.

Existe no entanto uma dificuldade associada às ligações aço-madeira. As diferentes características dos materiais de aço e madeira, em relação a variações de volume devido à temperatura e humidade, trazem um problema adicional ao dimensionamento das ligações entre estes materiais, onde forças adicionais actuam no sistema.

3.2 – LIGAÇÕES TRADICIONAIS

Dada a sua abundância e facilidade de manuseamento, a madeira foi um dos primeiros elementos naturais com fins estruturais trabalhado pelo Homem. Com diferentes diâmetros e comprimentos, a madeira foi naturalmente o material escolhido para criar estruturas, como cabanas para habitação. A forma mais simples de criar uma cabana consiste numa estrutura isostática em três dimensões – um tripé. Por si só, a utilização desta estrutura cria a necessidade de uma ligação a unir os elementos de madeira.

No princípio as ligações eram executadas com recurso a elementos naturais que faziam um nó a ligar os elementos. Mais tarde os elementos naturais foram substituídos por peles. Com o desenvolvimento de novas ferramentas, também estas ligações evoluíram no sentido de moldar a madeira para criar uma ligação mais resistente. O uso de cortes nos elementos permitiu também ao Homem aperceber-se que existem direcções preferenciais na estrutura da madeira.

Na Europa, o dimensionamento de ligações através de conectores de madeira está bastante desenvolvido. Esta técnica é usada para esconder as ligações. É no entanto consumidora de muito tempo uma vez que é produzida manualmente. Nestes casos, a manutenção é de elevada importância para a segurança da estrutura.

As ligações tradicionais assentam essencialmente na carpintaria. A moldagem da secção é bastante importante e o desenho deste tipo de ligação apresenta um papel preponderante no seu dimensionamento. Por ser conseguida por cortes num elemento estrutural, frequentemente as tensões que actuam num elemento não são nem paralelas nem perpendiculares à direcção do fio. Assim, é necessário ter em atenção a geometria da secção e a direcção em que as forças actuam sendo necessário saber a capacidade resistente da madeira nas várias direcções através da equação de Hankinson (Equação 2.3).

3.3 – LIGAÇÕES COM COLA

As colas são um bom meio de ligar dois elementos estruturais de madeira. No entanto, existe uma falta de precisão relativamente às regras do seu dimensionamento. Para além de ser necessário um rigoroso controlo de qualidade, a colagem deve vir sempre feita de fábrica ao contrário dos outros tipos de conectores que são facilmente colocados no local da obra. O controlo de qualidade da ligação não passa apenas pela montagem em fábrica que elimina variáveis como sujidade e que limita a força resistente da cola. A humidade é um factor externo que também diminui a resistência de uma cola.

As grandes vantagens da cola são a economia do material a utilizar, a utilização de toda a secção de um elemento estrutural (uma vez que não é preciso cortar ou furar a madeira para ligar dois elementos estruturais) e o fácil modo de aplicação, nomeadamente em reparações e reabilitação de estruturas.

A capacidade resistente de uma ligação colada depende do comportamento pós cedência da cola. Se uma cola é dúctil, então as tensões de corte são as que melhor descrevem o comportamento da ligação. O comportamento de uma ligação com recurso a uma cola frágil é maioritariamente comprometido pelo módulo de distorção da cola. Uma definição (Crocetti et al, 2011) para a fragilidade ou ductilidade de uma cola (r) é a relação entre a sua capacidade resistente ao corte (f_v) e o seu módulo de distorção (G_f). Quanto maior for esta relação, mais frágil é a cola. Por outro lado, quanto menor for essa relação, mais dúctil esta é, de acordo com a Equação 3.1.

$$r = \frac{f_v}{G_f} \quad (3.1)$$

É difícil criar uma ligação onde a cola actue puramente ao corte ou esforço normal. É também difícil separar as componentes das tensões mesmo em testes laboratoriais. Assim, os dados de capacidade resistente ao corte e módulo de distorção de uma cola apenas existem para algumas colas.

Na execução de estruturas de madeira, nomeadamente em pavimentos, a utilização de secções mistas (vários produtos derivados da madeira) é bastante comum. Para ligar os vários elementos dessa secção (alma e banzos) as ligações com recurso a cola são bastante utilizadas. Apesar de também serem utilizados pregos na ligação, a cola é considerada como o único elemento activo na ligação. É usada a cola por permitir que interacção total entre os elementos possa ser considerada. Os pregos apenas garantem a conexão entre elementos.

Muitas vezes a distribuição de tensões de corte numa ligação com recurso a colas é considerada constante. Esta consideração reduz significativamente os dados necessários para resolver o problema. Na Figura 3.1 é representada uma ligação colada. O elemento de cima é o elemento estrutural 1, o de baixo o elemento estrutural 2 e no meio está a cola. O comprimento da zona colada está representado pela letra l e a largura pela letra b .

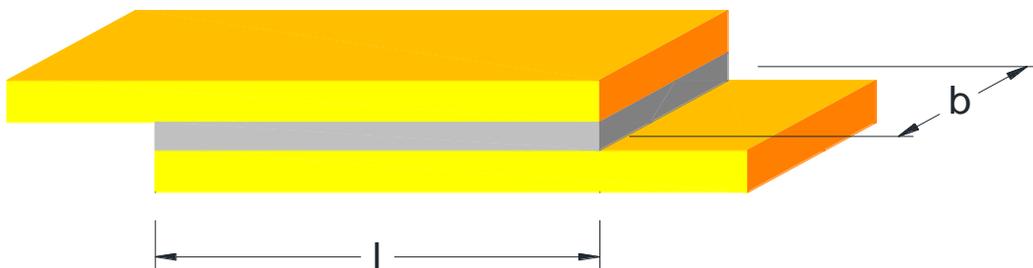


Figura 3.1 - Esquema de uma ligação colada

A tensão neste caso (τ_m) é uma relação directa entre a força aplicada (P) e a área colada, que será a tensão média, como apresentado na Equação 3.2. O pressuposto é um deslocamento relativo constante entre as diferentes secções dos elementos ligados, de acordo com a Figura 3.2.

$$\tau_m = \frac{P}{b \cdot l} \quad (3.2)$$

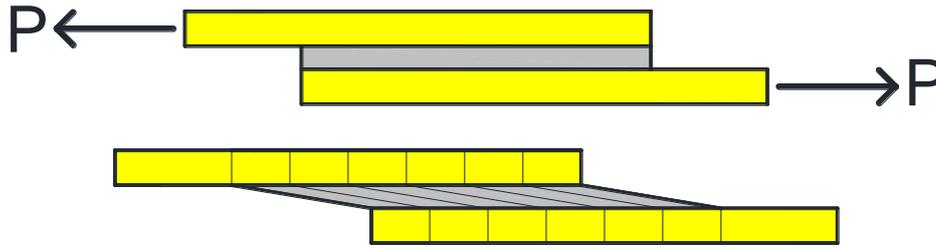


Figura 3.2 - Deslocamento relativo com tensão constante

Na realidade, esse deslocamento relativo é variável, e assim também são as tensões de corte. As tensões máximas são atingidas nos extremos da ligação, sendo no centro que as tensões de corte são mínimas. Esta conclusão foi descrita por Volkersen em 1938, que sugeriu a distribuição de tensões de corte ($\tau(x)$) numa ligação de acordo com o apresentado na Equação 3.3. No sistema de eixos considerado na equação, x é contabilizado a partir do meio do comprimento colado. É ao longo desse comprimento que a equação descreve as tensões.

Nessa equação existe um grande número de parâmetros. É necessário conhecer o módulo de elasticidade do elemento estrutural 1 (E_1) e do elemento estrutural 2 (E_2). As tensões dependem ainda do módulo de distorção da cola (G_f) e da espessura da mesma (d). Através da espessura e largura do elemento estrutural 1 (t_1 e b_1 respectivamente) e do elemento estrutural 2 (t_2 e b_2 respectivamente) obtém-se a área da secção de cada um destes elementos (A_1 para o elemento estrutural 1 e A_2 para o elemento estrutural 2).

A Figura 3.3 representa esquematicamente a variação dos deslocamentos relativos numa ligação colada através do modelo de Volkersen.

$$\tau(x) = \tau_m \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\cosh\left(\frac{\rho \cdot x}{l}\right)}{\sinh\left(\frac{\rho}{2}\right)} - \frac{(1 - \alpha) \cdot \sinh\left(\frac{\rho \cdot x}{l}\right)}{(1 + \alpha) \cdot \cosh\left(\frac{\rho}{2}\right)} \right) \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{E_1 \cdot A_1}{E_2 \cdot A_2}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{G_f \cdot l^2}{E_1 \cdot t_1 \cdot d} \times (1 + \alpha)}$$

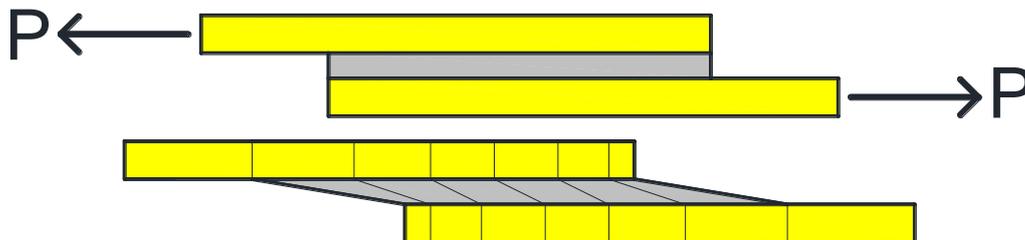


Figura 3.3 - Deslocamento relativo com tensão variável

A Figura 3.4 mostra a variação das tensões ao longo do comprimento colado, comparando as tensões através de ambos os métodos. No exemplo foi considerada uma força aplicada de 10kN. Ambos os elementos estruturais têm 45mm de espessura e o material utilizado é madeira maciça do tipo C30, cujo módulo de elasticidade é de 12GPa. Assim, α é igual a 1 (para o caso de tensão variável). O comprimento colado é de 400mm, a largura é de 100mm e a espessura de cola é de 1mm. A cola considerada é a cola resorcinol-fenol, cujo módulo de distorção é de 0,7MPa. O gráfico representa a azul a tensão média e a verde a tensão segundo Volkersen.

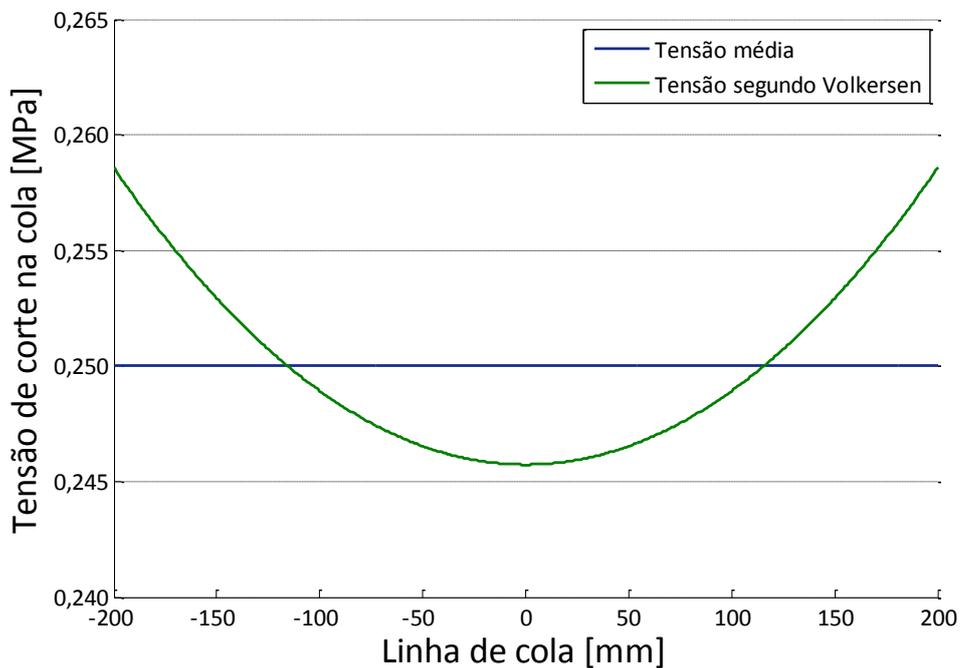


Figura 3.4 - Gráfico com a variação das tensões numa ligação colada

Modelos mais complexos foram também criados, nomeadamente por Goland e Reissner em 1944 que consideraram o momento provocado pela excentricidade das cargas aplicadas à ligação.

Para conceber ligações com conectores metálicos mais fortes, a cola pode também ser usada. Apesar de não haver regras de dimensionamento na área, foram realizados testes por Gustafsson e Serrano (Gustafsson & Serrano, 2001) e por Tlustochowicz, Serrano e Steigner (Tlustochowicz et al, 2011) com os cinco principais modos de rotura no caso de uso de colas em conjunto com conectores metálicos.

Estes modos de rotura são devidos ao corte ao longo do conector (parte a)), cedência do elemento estrutural de madeira à tracção (parte b)), rotura em grupo dos conectores (parte c)), separação das fibras da madeira (parte d)) ou à plastificação do conector (parte e)), como apresentado na Figura 3.5.

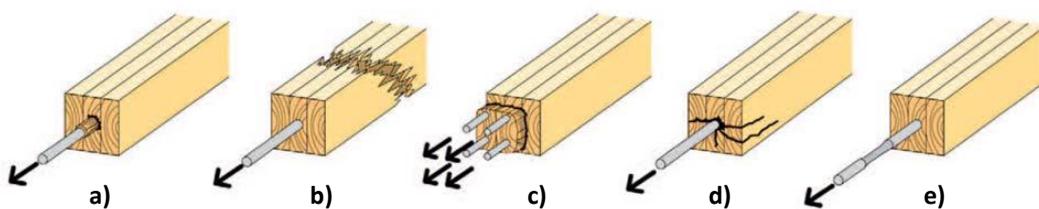


Figura 3.5 - Modos de rotura de ligações com elementos metálicos e cola [Tlustochowicz et al, 2011]

3.3.1 – LIGAÇÕES DE ENTALHES CRUZADOS E EM BISEL

As ligações coladas são muitas vezes usadas nos casos ligações de entalhes cruzados e em bisel. O primeiro consiste na execução de saliências em ambos os elementos que se ligam. O segundo caso consiste num corte em ambos os elementos onde é feita a ligação. O desperdício de material na ligação em bisel é enorme pois é dependente do ângulo que o corte faz. Dada a componente económica do dimensionamento de uma ligação, uma ligação em bisel é apenas utilizada em casos bastante específicos, nomeadamente na ligação de grandes elementos de madeira lamelada colada. A Figura 3.6 apresenta uma ligação de entalhes cruzados e outra em bisel.

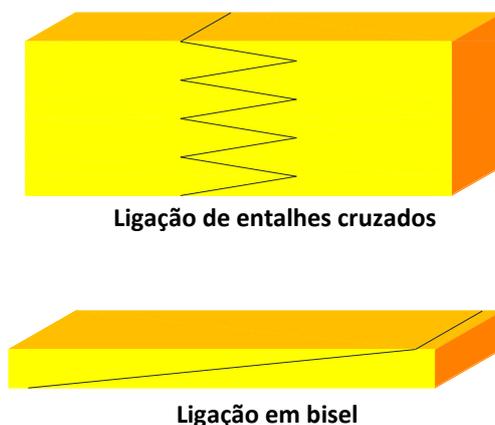


Figura 3.6 – Ligação de entalhes cruzados e ligação em bisel

O dimensionamento de uma ligação colada de entalhes cruzados é feito partindo das tensões de corte existentes nas saliências coladas. De modo a garantir a segurança da ligação, a capacidade resistente da ligação tem de ser maior que a capacidade resistente da madeira. A capacidade resistente da madeira é dada pelas tensões normais que actuam no elemento estrutural (σ) e a capacidade resistente da ligação pelas tensões de corte que actuam na cola (τ).

Os parâmetros que entram na equação da capacidade de uma ligação de entalhes cruzados estão apresentados na Figura 3.7. A Equação de equilíbrio de tensões está apresentada na Equação 3.4.

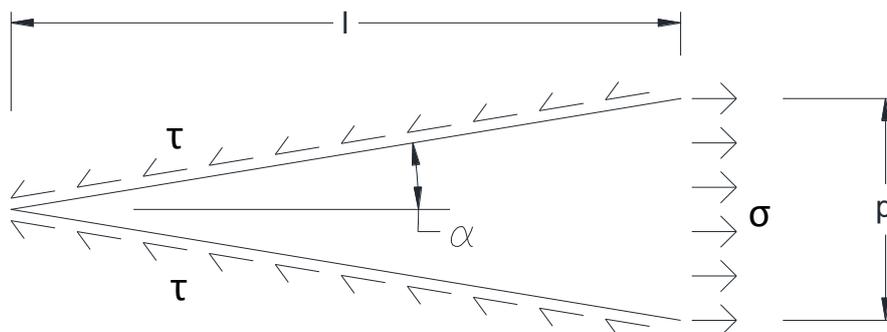


Figura 3.7 – Ligação de entalhes cruzados

$$\sigma \cdot p \leq \frac{2 \cdot \tau \cdot l}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha \Rightarrow \frac{\sigma}{\tau} \leq \frac{2 \cdot l}{p} \quad (3.4)$$

Conhecendo as capacidades resistentes dos materiais e através da relação estabelecida é possível criar e dimensionar uma ligação deste tipo através das medidas que as saliências terão de ter. Frequentemente obtém-se a relação entre capacidades resistentes apresentada na Equação 3.5.

$$\frac{\sigma}{\tau} > 6 \Rightarrow \frac{l}{p} > 3 \quad (3.5)$$

A ligação em bisel depende das tensões normais que actuam no elemento estrutural de madeira e as tensões de corte (τ) e normais (σ_l) que actuam na ligação. Para determinar a capacidade resistente desta ligação é feito o equilíbrio das forças horizontais (F_H) e verticais (F_V) que actuam na ligação.

Este equilíbrio e as variáveis necessárias estão representados na Figura 3.8. A parte a) apresenta as tensões que actuam na ligação e a parte b) a soma vectorial dessas forças. A relação matemática é dada pelas equações presentes na Equação 3.6.

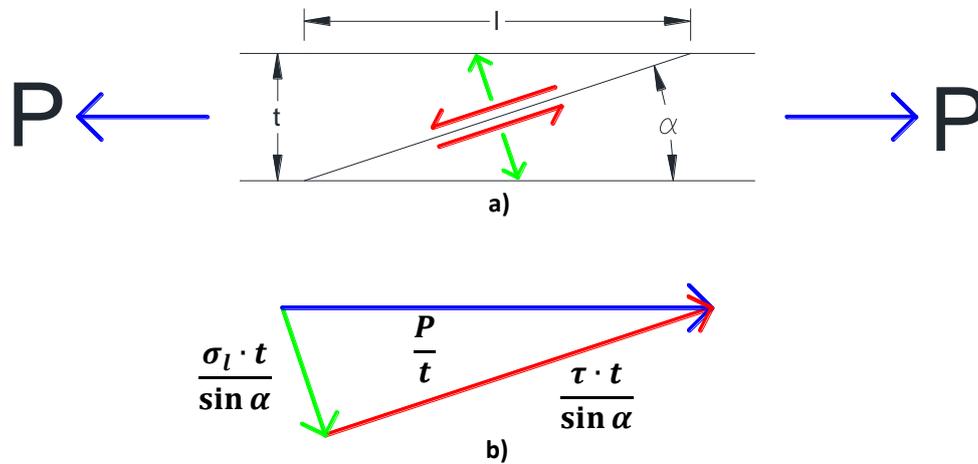


Figura 3.8 - Equilíbrio numa ligação em bisel

$$\begin{aligned} F_H = 0 &\Rightarrow \left(\frac{\sigma_l \cdot t}{\sin \alpha}\right) \cdot \sin \alpha + \left(\frac{\tau \cdot t}{\sin \alpha}\right) \cdot \cos \alpha = \frac{P}{t} \\ F_V = 0 &\Rightarrow \left(\frac{\sigma_l \cdot t}{\sin \alpha}\right) \cdot \cos \alpha - \left(\frac{\tau \cdot t}{\sin \alpha}\right) \cdot \sin \alpha = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Destas equações obtém-se a relação entre as tensões de corte e normais que actuam na ligação e as tensões normais que actuam no elemento estrutural de madeira, dadas pela Equação 3.7.

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \frac{P}{t} \cdot \sin^2 \alpha \\ \tau &= \frac{P}{t} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.7)$$

Variando o ângulo do corte da ligação, é possível obter os diferentes valores para cada uma destas tensões. Este tipo de ligação não apresenta variações de tensões ao longo do corte, nomeadamente picos nos extremos. Isto quer dizer que ao contrário das ligações coladas tradicionais, a cola presente neste tipo de ligação tem toda a mesma deformação. A variação da tensão normal e de corte na cola em função da relação entre l e t (o inverso da tangente de α) da ligação em bisel é apresentada na Figura 3.9. A azul está representado τ e a verde σ_1 .

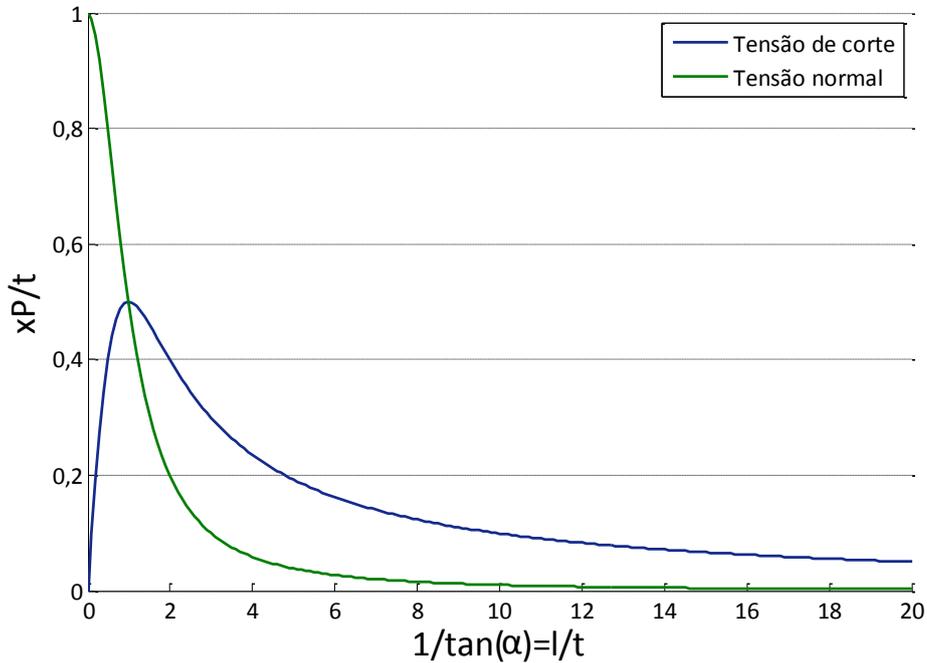


Figura 3.9 - Gráfico com a variação das tensões na cola de uma ligação em bisel

Do mesmo modo que as ligações de entalhes cruzados, a segurança da ligação é garantida se a capacidade resistente ao corte da mesma for maior do que a do elemento estrutural de madeira. A relação frequentemente utilizada entre estas tensões é a mesma que a ligação de entalhes cruzados, como descrito na Equação 3.8.

$$\frac{P/t}{\tau} = \frac{1}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} > 6 \Rightarrow \alpha < 10^\circ \quad (3.8)$$

Pela Figura 3.9 é também observável que para uma relação entre l e t superior a 10, as tensões σ_1 são praticamente nulas. Porque a cola resiste melhor ao corte, é recomendável que as tensões normais não existam. Assim, a relação acima referida corresponde à relação frequentemente usada neste tipo de ligações, que corresponde a um ângulo α de aproximadamente 6° .

3.4 – CONECTORES METÁLICOS

Os conectores metálicos são geralmente de aço. Para estes conectores há a necessidade de conhecimento do material para saber a sua resistência. Em relação aos conectores metálicos existe toda uma gama de formas dependendo daquilo que o projectista considera melhor em cada caso. Havendo a necessidade de grande ductilidade destes conectores, são feitos ensaios experimentais de acordo com os diferentes modos de rotura que uma ligação pode ter. A rotura frágil não é permitida e a ductilidade do conector permite trabalhar em regime plástico. Conectores de aço de resistência mais elevada são mais propícios a um comportamento frágil.

As cavilhas são cilindros metálicos sem cabeça e frequentemente lisos. Algumas cavilhas podem possuir uma textura mais rugosa, mas todas possuem um diâmetro superior a 8mm. O seu uso requer sempre a pré-furação do elemento estrutural.

Os pregos são os conectores metálicos com cabeça e diâmetro inferior a 8mm. Podem por isso ser usados recorrendo a furos pré-furados ou não. A sua superfície maioritariamente lisa faz com que seja mais difícil o prego trabalhar por atrito lateral. Quer isto dizer que um prego não funciona da mesma maneira em todas as direcções. Um factor importante a ter em conta é que a produção de pregos não é controlada como a de parafusos, ou seja, são as especificações do comerciante que permitem dimensionar uma ligação, não havendo normalização de tamanhos, diâmetros nem resistência. Outra nota importante em relação aos pregos é que para uma protecção contra a corrosão não basta galvanizar o prego. A galvanização é uma camada muito fina que se pode soltar com a entrada do prego no elemento estrutural. A solução para este problema é a utilização de pregos com maior espessura. Os pregos podem ser torcidos, redondos ou quadrados.

A Figura 3.10 apresenta como exemplo dois tipos de pregos. Na parte a) é apresentado um prego redondo e respectiva cabeça. Na parte b) é apresentado um prego quadrado e a respectiva cabeça.

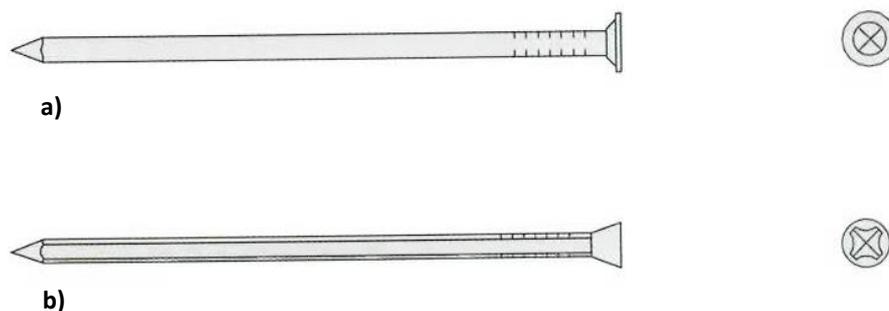


Figura 3.10 - Pregos [Crocetti et al, 2011]

Os parafusos são soluções bastante competitivas em ligações nas estruturas de madeira. Os parafusos usados nas ligações têm de ser relativamente pequenos: parafusos muito grandes geram tensões elevadas na zona onde estão inseridos levando à separação dos fios da madeira partindo a secção. Como é perceptível, existem distâncias mínimas de segurança para a utilização destes parafusos, quer entre parafusos, quer entre parafusos e limite exterior do elemento estrutural. Estas distâncias mínimas permitem o melhor funcionamento da ligação, uma vez que torna mais difícil a secção partir, existindo mais material resistente entre zonas críticas da secção (furos e limites). O aumento destas distâncias permite obter uma maior ductilidade e um aumento da resistência da secção, com a vantagem de se poder conseguir, por vezes, utilizar menos parafusos. A utilização de parafusos em conjunto com chapas perfuradas costuma ser uma solução frequentemente adoptada. É preciso ter especial atenção com estes conectores na sua aplicação na madeira, em especial devido ao esmagamento da secção que estes podem provocar se forem muito apertados. A solução é deixar sempre a cabeça do parafuso de fora de modo a não condicionar a resistência do elemento estrutural.

Na Figura 3.11 é apresentado um parafuso.



Figura 3.11 - Parafuso [Crocetti et al, 2011]

Os parafusos de porca têm uma zona lisa e outra rosçada. O seu diâmetro é superior a 8mm. Normalmente, uma anilha é utilizada entre a cabeça do parafuso e o elemento estrutural. O uso da anilha permite distribuir o pré-esforço proveniente do parafuso de porca por uma maior área de contacto, evitando assim o esmagamento localizado da madeira.

Na Figura 3.12 é apresentado um parafuso de porca.

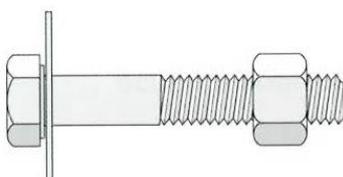


Figura 3.12 - Parafuso de porca [Crocetti et al, 2011]

As cavilhas, pregos, os parafusos e parafusos de porca estão inseridos no grupo de conectores do tipo cavilha. Por possuírem então características geométricas idênticas, apresentam também um comportamento idêntico numa ligação. Os conectores do tipo cavilha são caracterizados pela sua forma cilíndrica onde o seu comprimento é muito superior ao diâmetro. As características resistentes deste tipo de conectores apresentam-se em dois valores: f_u é a tensão de rotura à tracção do aço e f_y a tensão de cedência.

Na Figura 3.13 é apresentada uma cavilha.



Figura 3.13 - Cavilha [Crocetti et al, 2011]

Os conectores do tipo cavilha são frequentemente usados para resistir ao corte. Isto quer dizer que as forças na ligação actuam perpendicularmente ao conector. O uso destes conectores a forças paralelas é possível, no entanto o uso de pregos ou agrafos à tracção, agravado com o facto de estes possivelmente se encontrarem paralelos à direcção do fio de um elemento estrutural de madeira, é facilmente vencido. Quando não podem ser ultrapassados, estes casos podem ser solucionados com o uso de muitos e pequenos conectores, com o intuito de distribuir a força da ligação.

A deformação do conector vai depender se este se encontra mais fixo ou solto dentro do elemento estrutural. No primeiro caso não há deformação do conector, mas no segundo a deformação pode levar à criação de uma ou mais rótulas plásticas no conector. O uso de conectores do tipo cavilha à compressão pode levá-los a encurvar dentro do elemento estrutural.

As placas metálicas são normalmente combinadas com pregos. Por já terem os furos para entrarem os pregos, as placas por si só já preenchem o requisito do espaçamento entre conectores. Existem placas metálicas que não necessitam da utilização de pregos, uma vez que têm segmentos de chapa cortados e colocados perpendicularmente ao plano da placa. As placas têm uma espessura máxima de 2mm.

A Figura 3.14 apresenta como exemplo duas chapas metálicas. Na parte a) é apresentada uma chapa metálica com os furos para os conectores. Na parte b) a chapa já tem segmentos cortados que perfuram o material não sendo necessário o uso de outro tipo de conectores.

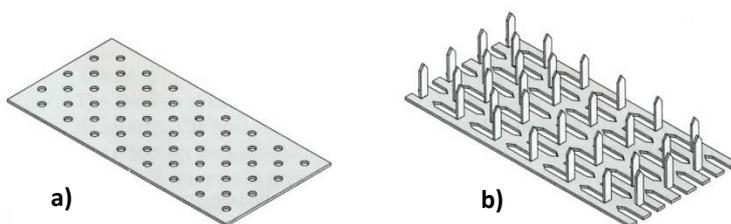


Figura 3.14 - Placas metálicas [Crocetti et al, 2011]

As placas circulares são dos conectores mais antigos que ainda são usados. Esta ligação fica essencialmente entre elementos estruturais, havendo a necessidade de fazer cortes nos elementos, onde a placa vai ficar. Esta ligação pode também ser usada em estruturas mistas madeira-aço e madeira-betão. As placas circulares podem apresentar-se dentadas para uma ligação mais resistente – os dentes da placa ficam cravados na madeira. Semelhante às placas circulares existem também os anéis. Estes conectores só trabalham por esforço transversal, sendo o modo de rotura conhecido – o prato ou anel arranca parte do elemento estrutural de madeira quando se dá a rotura da ligação (rotura por corte), ou então o conector parte. Os anéis são classificados de A1 a A5, as placas de B1 a B4 e as placas dentadas de C1 a C11. Dada a semelhança do aspecto visual exterior, é difícil distinguir o tipo de placa quando esta é usada numa ligação.

Capítulo 4 – DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES COM CONECTORES DO TIPO CAVILHA

4.1 – PARÂMETROS DA LIGAÇÃO

A capacidade resistente de uma ligação com recurso a conectores do tipo cavilha depende de três parâmetros: a capacidade resistente da madeira (f_h), o momento de plastificação do conector (M_y) e de uma força de ancoragem (ΔF).

4.1.1 – CAPACIDADE RESISTENTE DA MADEIRA

A capacidade resistente da madeira é caracterizada pela máxima tensão transmitida pelo conector sem levar as fibras da madeira à cedência. Esta característica da madeira é determinada de acordo com a EN383 onde um conector do tipo cavilha é pressionado contra o elemento de madeira onde está inserido. As pressões geradas na madeira devido a este teste não são lineares. De modo a facilitar o dimensionamento, estas tensões são consideradas constantes numa projecção da área que pressiona a madeira, sendo assim dependente do diâmetro do conector e do comprimento que está a pressionar o material.

Os três factores que o Eurocódigo 5 tem em conta são o valor característico do peso volúmico da madeira (ρ_k), o diâmetro do conector (d) e se a madeira foi pré-furada ou não. Uma madeira mais densa resulta numa maior capacidade resistente, uma vez que há mais material a resistir à força. Um diâmetro pequeno do conector afecta menos material, aumentando a capacidade resistente da madeira. Blass (Blass, 2003) sugeriu que um furo pode ter um diâmetro até 2mm superior ao do conector que nele está inserido sem afectar a capacidade resistente da madeira. O caso de a madeira ter sido pré-furada ou não, está relacionado com tracções perpendiculares à direcção do fio. Um furo pré-furado tem as tensões transmitidas a actuarem directamente paralelas ao fio, onde o esmagamento do material inviabiliza a ligação. No caso de uma ligação cujo furo não foi pré-furado, a colocação do um conector causa tracções perpendiculares ao fio. Quando uma força actua no conector, no caso do furo que não foi pré-furado, a separação das fibras da madeira é mais fácil que no caso do furo pré-furado. Deste modo, uma ligação cujo furo foi pré-furado apresenta uma maior capacidade resistente da madeira. A parte a) da Figura 4.1 apresenta um furo pré-furado, a parte b) apresenta um furo que não foi pré-furado. O Eurocódigo 5 não permite furos que não foram pré-furados para conectores cujo diâmetro superior a 8mm ou para madeiras cujo valor característico do peso volúmico seja maior do que 500Kg/m^3 .

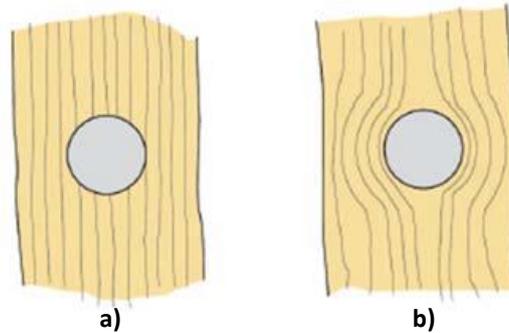


Figura 4.1 - Furo pré-furado (parte a) e não pré-furado (parte b)) [Kliger, 2013]

Outros factores que influenciam a capacidade resistente da madeira são o ângulo que a força faz com a direcção do fio, o atrito que existe entre o conector e o elemento estrutural, a humidade e a existência de reforços perpendiculares à direcção do fio. O ângulo que a força faz com a direcção do fio afecta a capacidade resistente da madeira no sentido em que esta é mais resistente à compressão paralela à direcção do fio e menos resistente à tracção perpendicularmente à direcção do fio. O atrito existente entre o conector e o elemento estrutural importa, pois quanto maior for esse atrito (devido a uma superfície rugosa do conector, por exemplo) maior é a capacidade resistente da madeira. A humidade entra na capacidade resistente da madeira, uma vez que influencia o comportamento do elemento estrutural: se a humidade for muito elevada, a capacidade resistente da madeira diminui.

A separação dos fios da madeira é um modo de rotura devida a tensões perpendiculares à direcção do fio, causando uma fenda paralela à direcção do fio. Este modo de rotura é frequente para ligações cujo furo não foi pré-furado ou em que a força é aplicada perpendicular à direcção do fio. Ao reforçar a madeira na direcção perpendicular à direcção do fio, a abertura da fenda é mais difícil de ocorrer, aumentando assim a capacidade resistente da madeira.

Para ligações em madeira maciça cujo furo não foi pré-furado, a capacidade resistente da madeira na direcção do fio é dada no Eurocódigo 5 pela Equação 4.1.

$$f_{h0} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (4.1)$$

Para as mesmas ligações cujo furo foi pré-furado, o Eurocódigo 5 considera como capacidade resistente da madeira a Equação 4.2.

$$f_{h0} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \quad (4.2)$$

Ambas as equações são empíricas. Deste modo, as unidades que resultam das equações não são compatíveis com as unidades da capacidade resistente da madeira. Em ambas as equações, o peso volumico é considerada em Kg/m^3 , o diâmetro em mm e a capacidade resistente resultante em MPa.

Para pregos, a diferença entre capacidades resistentes da madeira com forças aplicadas em diferentes ângulos com a direcção do fio não varia muito, podendo ser desprezada. O mesmo já não acontece com parafusos. Neste caso, uma redução deve ser considerada onde a nova capacidade resistente da madeira ($f_{h\alpha}$) é calculada de acordo com a equação de Hankinson (Equação 2.3). Para o cálculo da capacidade resistente da madeira perpendicular ao fio (f_{h90}), o Eurocódigo 5 usa uma fórmula empírica dependente do diâmetro do parafuso (d) que é usado em mm. Essa fórmula é apresentada na Equação 4.3.

$$f_{h90} = \frac{f_{h0}}{1,35 + 0,015 \cdot d} \quad (4.3)$$

4.1.2 – MOMENTO DE PLASTIFICAÇÃO DOS CONECTORES

O momento de plastificação dos conectores do tipo cavilha pode ser facilmente calculado. Sabendo a tensão de cedência do aço (f_y) e o seu diâmetro (d) conseguimos determinar o valor teórico para o momento de plastificação (M_y).

A plastificação da secção acontecerá quando todas as fibras da secção estiverem plastificadas, obtendo assim um diagrama de tensões constante e igual à tensão de cedência do aço. Conhecendo a área de meio círculo (A) e a excentricidade do centro de gravidade dessa área (e) é possível obter o valor do momento de plastificação do conector. O momento de plastificação é apresentado na Equação 4.4.

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi \cdot d^2}{8} \\ e &= \frac{2 \cdot d}{3 \cdot \pi} \\ M_y &= 2 \cdot A \cdot e \cdot f_y = \frac{f_y \cdot d^3}{6} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Apesar de este ser o momento de plastificação teórico do conector, não é o usado pelo Eurocódigo 5. O teste que determina o momento plástico é o preconizado na EN408, onde se considera que para ter comportamento plástico, o conector tem de resistir a extensões muito elevadas. Uma rótula plástica será considerada como tal se quando submetida ao teste da norma EN408 resistir a um grande ângulo de deformação devido à força aplicada. Este ângulo é considerado como sendo superior a 45°. O ensaio consiste em tratar o conector como uma viga simplesmente apoiada com uma força concentrada aplicada no meio.

No geral, uma ligação rompe antes de se atingir os referidos 45°. O Eurocódigo 5 adoptou uma fórmula que tem em conta este critério para o cálculo do momento plástico de um conector do tipo cavilha. A equação é empírica e fornece o momento de plastificação (M_y) em N.mm. É dependente da tensão última à tracção (f_u) em MPa e do diâmetro (d) em mm, e é apresentada na Equação 4.5.

$$M_y = \frac{f_u}{600} \cdot 180 \cdot d^{2,6} \quad (4.5)$$

Considerando um parafuso de classe 6.8 com f_u de 600MPa e f_y de 480MPa, é possível comparar os resultados fornecidos pelo Eurocódigo 5 com os teóricos para diferentes diâmetros. Os valores realçados na Figura 4.2 correspondem aos diâmetros de 12mm, 16mm, 20mm, 24mm, 27mm e 30mm.

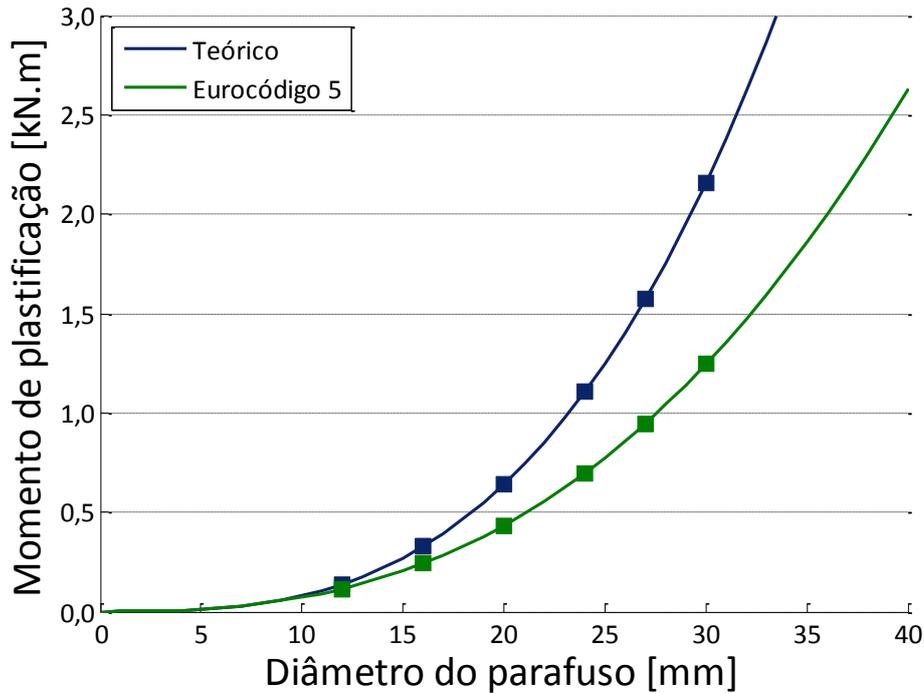


Figura 4.2 - Gráfico com os momentos de plastificação de parafusos

4.1.3 – FORÇA DE ANCORAGEM

Nos modos de rotura de uma ligação a resistir ao corte em que existe uma rótula plástica no conector, existe também uma força de ancoragem associada. Na Figura 4.3 está representada a força resistente da ligação (F) acrescentada à força de ancoragem (ΔF). Esta ocorre essencialmente devido ao ângulo que o parafuso faz. Esse ângulo cria uma força de tracção no parafuso (F_t), que se equilibra com uma força de compressão (F_c) formando uma força de ancoragem.

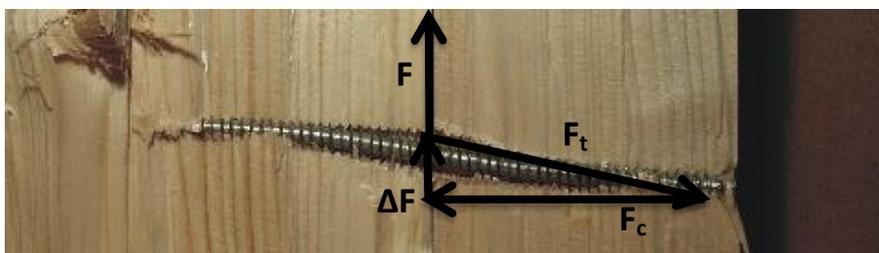


Figura 4.3 - Força de ancoragem [adaptado de Kliger, 2013]

Esta força de ancoragem será assim tanto maior quanto maior for o ângulo que o conector faz com o elemento estrutural aquando da rotura da ligação. Também a superfície do conector tem interferência nesta força: um prego, por ter uma superfície mais lisa (sem atrito lateral), possui uma força de arrancamento bastante inferior à de um parafuso. Uma maneira de aumentar esta força de arranque pode ser recorrendo a parafusos e porcas que, pré-esforçando o parafuso, aumenta o atrito entre os elementos a ligar.

Esta contribuição para a resistência da ligação pode ser significativa. Kuipers e Van Der Put (Kuipers & Van Der Put, 1982) mostraram que esta força de ancoragem pode aumentar a resistência de uma ligação a resistir ao corte em 260%. Uma vez que as expressões que determinam o valor desta força foram desenvolvidas a partir de vários casos de estudo, os ensaios laboratoriais de uma ligação específica fornecem os melhores resultados do valor da força de ancoragem.

O Eurocódigo 5 considera que a força de ancoragem (F) é dependente da capacidade resistente do conector à tracção (F_{ax}), como apresentado na Equação 4.6.

$$F = \frac{F_{ax}}{4} \quad (4.6)$$

O Eurocódigo 5 indica ainda percentagens máximas que a força de ancoragem pode ter em relação à capacidade resistente da ligação. Para o caso de cavilhas, o Eurocódigo 5 indica que a força de ancoragem não pode ser usada; para pregos redondos, esta força está limitada a 15% da capacidade resistente da ligação; pregos quadrados têm a força de ancoragem limitada a 25%; outros pregos a 50%; parafusos de porca a 25%; e parafusos a 100%. Esta força pode não ser tida em consideração no dimensionamento de uma ligação, uma vez que o seu cálculo é complexo e ao ignorá-la o dimensionamento é feito pelo lado da segurança.

Para pregos, a grande dependência da superfície do conector faz com que a tensão gerada por atrito lateral (f_{ax}) seja fundamental no cálculo da força de ancoragem. A obtenção deste valor é feita recorrendo aos testes presentes nas normas EN1382, EN1383 e EN14358. No caso de não ser possível, pode ser usada uma fórmula empírica para a determinar. Esta equação depende do valor característico do peso volúmico (ρ_k) que é usada em Kg/m^3 e o resultado é dado em MPa, estando apresentada na Equação 4.7.

$$f_{ax} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (4.7)$$

A capacidade resistente do prego à tracção (F_{ax}) é dependente do diâmetro do prego (d) e do comprimento de penetração do conector na madeira (l), como mostrado na Equação 4.8.

$$F_{ax} = f_{ax} \cdot d \cdot l \quad (4.8)$$

No caso dos parafusos, a dependência do atrito lateral (f_{ax}) também é relevante. Sendo também calculado através de uma equação empírica, depende do valor característico do peso volúmico da madeira (ρ_k) em Kg/m^3 e do ângulo que o conector (paralelo à força) faz com a direcção do fio (α). O resultado vem em MPa. Esta fórmula é apresentada na Equação 4.9.

$$f_{ax,\alpha} = \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,5}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (4.9)$$

A capacidade resistente de um conjunto de parafusos à tracção (F_{ax}) é determinada através de outra equação empírica (Equação 4.10). Esta equação depende do diâmetro do parafuso (d) em mm, do comprimento de penetração (l) em mm e do número de parafusos que actuam em conjunto na ligação (n). O resultado é dado em N.

$$F_{ax} = n^{0,9} \cdot (\pi \cdot d \cdot l)^{0,8} \cdot f_{ax,\alpha} \quad (4.10)$$

Os parafusos apresentam uma maior capacidade de ancoragem de entre todos os conectores do tipo cavilha. A sua capacidade resistente a uma força paralela à direcção do parafuso é aproximadamente a mesma quer este esteja a trabalhar à tracção ou à compressão.

Para o caso de parafusos de porca, a sua capacidade resistente à tracção (F_{ax}) depende da área da anilha (A) e do valor característico da capacidade resistente da madeira à compressão perpendicular ao fio ($f_{c90,k}$), uma vez que será nessa direcção que o pré-esforço proveniente do parafuso será aplicado. Esta equação é apresentada na Equação 4.11.

$$F_{ax} = 3 \cdot f_{c90,k} \cdot A \quad (4.11)$$

Se, em vez de uma anilha existir uma placa, uma área equivalente à área da anilha terá de ser calculada. Essa área equivalente é dada por um círculo cujo diâmetro (D) depende da espessura da placa (t) ou do diâmetro do parafuso (d). O cálculo do diâmetro é dado pela Equação 4.12.

$$D = \min \left\{ \frac{12 \cdot t}{4 \cdot d} \right\} \quad (4.12)$$

Considerando um conector do tipo cavilha onde actua uma força paralela à direcção do fio ($F_{ax,s}$) e outra perpendicular ($F_{v,s}$), é necessário conjugar ambas as forças. Para o caso dos pregos, a capacidade resistente destes é linear, como mostra na Equação 4.13.

$$\frac{F_{ax,s}}{F_{ax}} + \frac{F_{v,s}}{F_v} \leq 1 \quad (4.13)$$

Para o caso de outro conector do tipo cavilha, esta capacidade resistente é quadrática, de acordo com a Equação 4.14.

$$\left(\frac{F_{ax,s}}{F_{ax}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,s}}{F_v} \right)^2 \leq 1 \quad (4.14)$$

4.2 – CAPACIDADE RESISTENTE DE UMA LIGAÇÃO MADEIRA-MADEIRA

Johansen (Johansen, 1949) desenvolveu um estudo que determina a capacidade resistente de uma ligação entre elementos estruturais de madeira recorrendo a conectores do tipo cavilha. Assumiu para isso, que tanto os elementos a ligar, como os conectores apresentam um comportamento rígido-plástico. Segundo Johansen, a rotura de uma ligação deste tipo pode dar-se por três diferentes modos correspondentes à criação de nenhuma, uma ou duas rótulas plásticas no conector que é conjugado com o esmagamento ou não do elemento estrutural. Em todos os modos, a rotura acontece porque um mecanismo é formado na ligação.

Para facilitar o cálculo da capacidade resistente da ligação, o número de variáveis presentes nas equações dos diferentes modos de rotura foi reduzida ao mínimo. Para isso foi criada uma relação entre as capacidades resistentes de ambos os elementos estruturais presentes na ligação (β). Essa relação é a apresentada na Equação 4.15.

$$\beta = \frac{f_{h2}}{f_{h1}} \quad (4.15)$$

Na Figura 4.4 são identificados os parâmetros principais dos modos de rotura de uma ligação: o diâmetro do conector (d) e a espessura de cada elemento estrutural (t_1 e t_2).

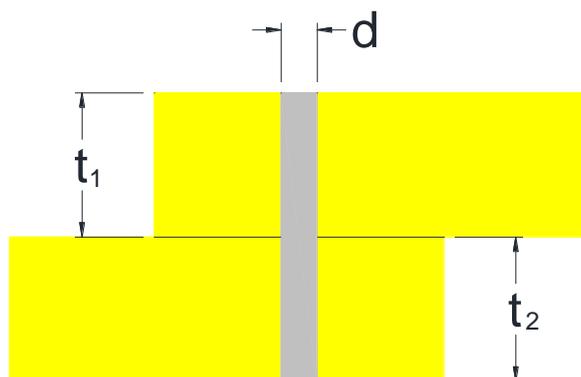


Figura 4.4 – Ligação entre dois elementos estruturais de madeira

No primeiro modo de rotura não existe a criação de rótulas plásticas no conector. Isto quer dizer que há duas maneiras de levar uma ligação à rotura: numa há o esmagamento do elemento estrutural e noutra o conector sofre uma rotação.

Para o primeiro caso, o cálculo da força máxima (F_v) que leva a ligação à rotura é dependente apenas das tensões que esmagam o elemento estrutural, como representado na Figura 4.5, podendo acontecer de cada lado da ligação. Depende assim da capacidade resistente, da espessura do elemento estrutural e do diâmetro do conector. Este modo de rotura é pouco comum em ligações pregadas. As equações que caracterizam a capacidade resistente da ligação para este modo de rotura estão apresentadas na Equação 4.16.

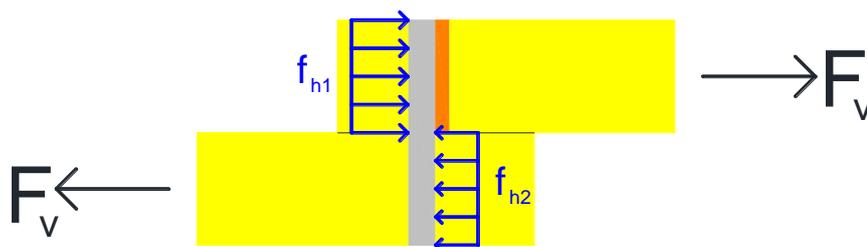


Figura 4.5 - Modo de rotura

$$F_v = f_{h1} \cdot t_1 \cdot d$$

$$F_v = f_{h2} \cdot t_2 \cdot d = \beta \cdot f_{h1} \cdot t_2 \cdot d \quad (4.16)$$

No segundo caso, o conector sofre uma rotação, pelo que a capacidade resistente da ligação é obtida por equilíbrio de momentos à esquerda (M_{esq}) e à direita (M_{dir}) da ligação. A capacidade resistente desta ligação é dada por uma equação bastante semelhante ao modo de rotura anterior. O modo de rotura está apresentado na Figura 4.6 e as equações que definem o equilíbrio de momentos estão presentes na Equação 4.17.

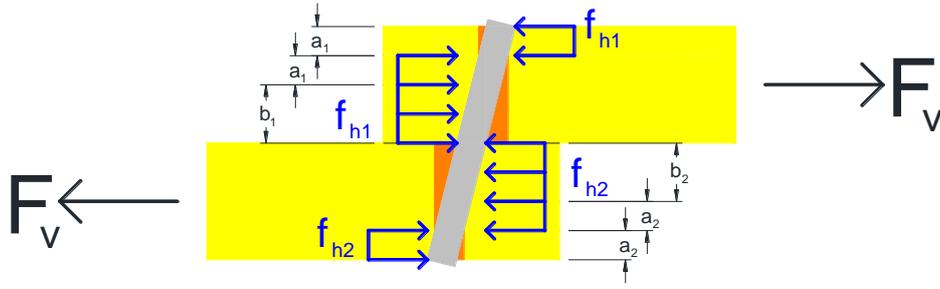


Figura 4.6 - Modo de rotura

$$\begin{aligned}
 F_v &= f_{h1} \cdot b_1 \cdot d = f_{h2} \cdot b_2 \cdot d \\
 M_{esq} &= f_{h1} \cdot d \cdot \left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) \\
 M_{dir} &= f_{h2} \cdot d \cdot \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Usando a relação obtida através de β e substituindo nas equações anteriores obtém-se a igualdade presente na Equação 4.18.

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \beta \cdot b_2 \\
 \frac{b_1^2 \cdot (1 + \beta)}{2 \cdot \beta} &= \beta \cdot a_2^2 + a_1^2
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Conhecendo a relação entre a_1 , t_1 e b_1 e a_2 , t_2 e b_2 , é possível descrever b_1 em função de outros parâmetros, obtendo a capacidade resistente da ligação para este modo de rotura. Essas equações estão apresentadas na Equação 4.19.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{t_1 - b_1}{2} \\
 a_2 &= \frac{t_2 - b_2}{2} \\
 b_1 &= \frac{t_1}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) \\
 F_v &= \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_1}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

No caso específico em que $f_{h1}=f_{h2}=f_h$ e $t_1=t_2=t$, a capacidade resistente da ligação pode ser simplificada para a Equação 4.20. É possível observar que para este modo de rotura, o caso da rotação do conector é mais gravoso para elementos estruturais de igual espessura.

$$F_v = f_h \cdot d \cdot t \cdot (\sqrt{2} - 1) \tag{4.20}$$

O segundo modo de rotura envolve a criação de uma rótula plástica no conector. Na secção da rótula plástica, o momento actuante é o momento de plastificação. Por ser o momento máximo no conector, o esforço transversal nessa secção é nulo. A Figura 4.7 representa este modo de rotura. As equações presentes na Equação 4.21 descrevem o equilíbrio de momentos em ordem a M_y .

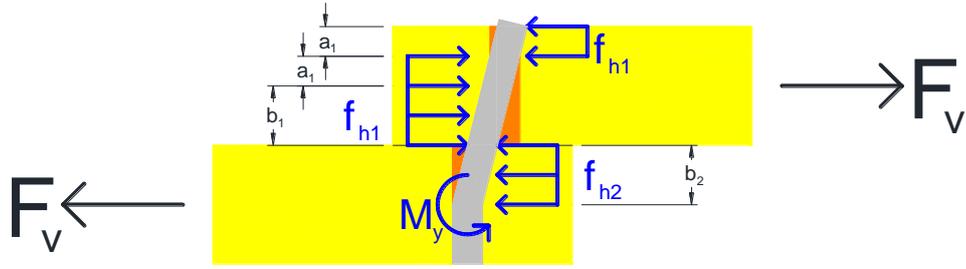


Figura 4.7 - Modo de rotura

$$\begin{aligned}
 F_v &= f_{h1} \cdot b_1 \cdot d \\
 F_v &= f_{h2} \cdot b_2 \cdot d = \beta \cdot f_{h1} \cdot b_2 \cdot d \\
 M_y &= f_{h1} \cdot d \cdot (b_1 + a_1) \cdot \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{h2} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2} - f_{h1} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(b_2 + b_1 + \frac{3 \cdot a_1}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Dependendo do lado da ligação onde a rótula plástica é formada, esta equação é resolvida em ordem a b_1 ou b_2 . Recorrendo às relações entre espessuras (a , b e t) e β , os valores de b_1 e de b_2 correspondem às equações presentes na Equação 4.22.

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{t_1}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right) \\
 b_2 &= \frac{t_2}{\beta + 2 \cdot \beta^2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right)
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Substituindo nas respectivas equações, obtém-se a capacidade resistente desta ligação, apresentadas na Equação 4.23.

$$\begin{aligned}
 F_v &= \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right) \\
 F_v &= \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_2}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right)
 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Para o caso em que $\beta=1$, as equações da capacidade resistente da ligação em ambos os casos são necessariamente iguais. No entanto, estas equações são dependentes da espessura do respectivo elemento estrutural. Se as espessuras também forem iguais ($t_1=t_2=t$), a capacidade resistente deste modo de rotura é dado pela Equação 4.24.

$$F_v = \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t}{3} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{1 + \frac{3 \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t^2}} - 1 \right) \quad (4.24)$$

O último modo de rotura é dado quando o conector apresenta duas rótulas plásticas. Este é o modo de rotura mais dúctil, uma vez que se forma uma rótula plástica em cada elemento de madeira ligado. Como no modo de rotura anterior, na secção da rótula plástica o conector está sujeito ao momento de plastificação. Também nesta secção o esforço transversal é nulo. Por equilíbrio de momento, a equação que se obtém é a Equação 4.25. A Figura 4.8 representa este modo de rotura.

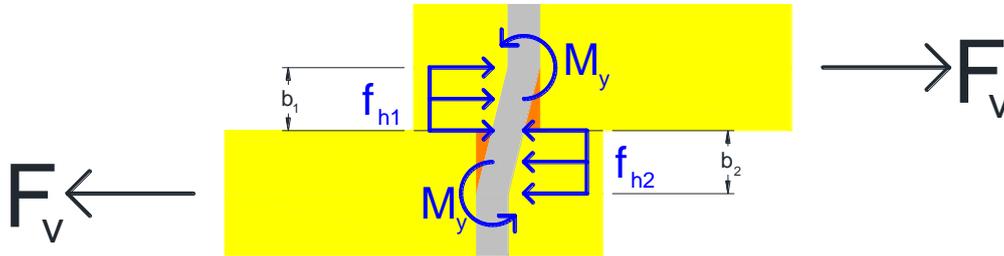


Figura 4.8 - Modo de rotura

$$2 \cdot M_y = f_{h1} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - f_{h2} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2} \quad (4.25)$$

Através da relação entre b_1 , b_2 e β , obtém-se a expressão que determina o valor de b_1 e o valor da capacidade resistente da ligação para este modo de rotura como apresentado na Equação 4.26.

$$b_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \beta \cdot M_y}{(1 + \beta) \cdot f_{h1} \cdot d}} \quad (4.26)$$

$$F_v = f_{h1} \cdot b_1 \cdot d = \sqrt{\frac{4 \cdot \beta \cdot M_y \cdot f_{h1} \cdot d}{1 + \beta}}$$

Este modo de rotura não depende da espessura dos elementos estruturais. Para o caso em que $\beta=1$, a capacidade resistente da ligação é dada pela Equação 4.27.

$$F_v = \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_{h1} \cdot d} \quad (4.27)$$

Por considerar que há uma força de tracção no conector que o modelo teórico não contabiliza, o Eurocódigo 5 faz um aumento das capacidades resistentes das ligações no modo de rotura com uma e duas rótulas plásticas. Para o primeiro caso, o Eurocódigo 5 considera um aumento de 5% da capacidade resistente da ligação. No segundo caso, o Eurocódigo 5 aumenta a capacidade resistente da ligação em 15%.

O modo de rotura está também relacionado com o número de planos de corte. A vantagem do uso de vários planos de corte é que a rotação do conector está impedida devido à simetria da ligação. De resto, os modos de rotura com dois planos de corte são em tudo iguais aos modos de rotura com um plano de corte. Assim, também as equações que descrevem a capacidade resistente de uma ligação com dois planos de corte (três elementos estruturais com apenas um conector do tipo cavilha a ligá-los) são as mesmas descritas para um plano de corte.

4.3 – CAPACIDADE RESISTENTE DE UMA LIGAÇÃO AÇO-MADEIRA

O uso de uma placa de aço numa ligação permite aumentar a capacidade resistente da mesma. Cedendo a madeira antes do aço (o aço é muito mais resistente do que a madeira), a placa de aço vai servir como um apoio ou um encastramento para o conector, dependendo da sua espessura.

Uma placa de aço fina permite que o conector rode livremente impossibilitando assim a formação de uma rótula plástica na secção. Neste caso, a placa de aço serve então como um apoio para o conector. A placa de aço é considerada fina quando a sua espessura é menor que metade do diâmetro do conector.

Uma placa espessa serve de encastramento ao conector impedindo que este rode. O resultado directo do uso de uma placa espessa é que a primeira rótula plástica é formada na secção que une o elemento estrutural de madeira à placa de aço. A placa de aço é considerada espessa se a sua espessura for maior que o diâmetro do conector.

Nos casos em que a placa não é considerada nem fina nem espessa, uma interpolação das capacidades resistentes para ambos os casos pode ser feita. Os parâmetros principais do cálculo da capacidade resistente destas ligações são o diâmetro do conector (d) e espessura do elemento estrutural (t), como mostrado na Figura 4.9.

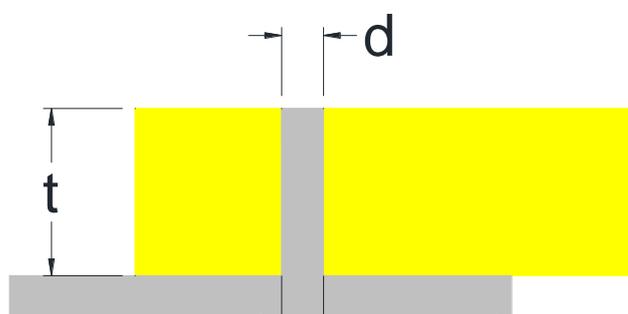


Figura 4.9 - Ligação entre um elemento estrutural de madeira e aço

Os modos de rotura de uma ligação com uma placa fina dão-se com a criação de nenhuma ou uma rótula plástica no conector. No modo de rotura em que não existe a criação de uma rótula plástica no conector, este roda dentro da ligação. Por equilíbrio de momentos é mais uma vez possível de obter a capacidade resistente da ligação, presente na Equação 4.28. O modo de rotura é apresentado na Figura 4.10.

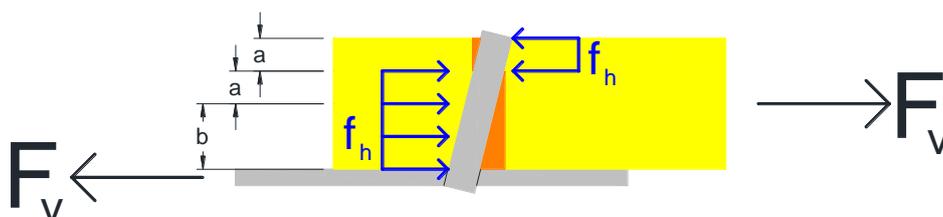


Figura 4.10 - Modo de rotura

$$f_h \cdot d \cdot \left(\frac{b^2}{2} - a^2 \right) = 0 \quad (4.28)$$

Através da relação entre a , b e t , é obtém-se o valor de b . O valor final da capacidade resistente da ligação é apresentado na Equação 4.29.

$$b = t \cdot (\sqrt{2} - 1)$$

$$F_v = f_h \cdot b \cdot d = f_h \cdot d \cdot t \cdot (\sqrt{2} - 1) \quad (4.29)$$

No caso de criação de uma rótula plástica, esta forma-se dentro do elemento estrutural de madeira. O equilíbrio de momentos fornece a Equação 4.30. O modo de rotura é apresentado na Figura 4.11.

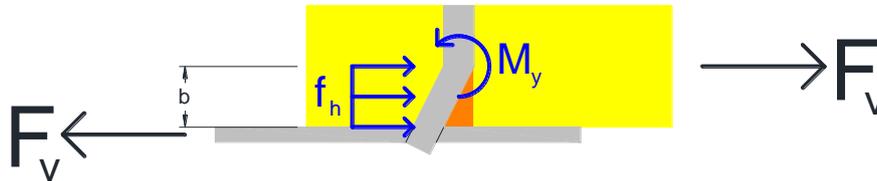


Figura 4.11 - Modo de rotura

$$M_y = f_h \cdot d \cdot \frac{b^2}{2} \quad (4.30)$$

O valor de b é então possível ser obtido directamente, bem como o valor da capacidade resistente da ligação, como apresentado na Equação 4.31.

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot M_y}{f_h \cdot d}}$$

$$F_v = f_h \cdot b \cdot d = \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_h \cdot d} \quad (4.31)$$

Os modos de rotura com uma placa de aço espessa são três, correspondendo à criação de nenhuma, uma e duas rótulas plásticas no conector. No modo de rotura em que não existem rótulas plásticas no conector, a rotura da ligação é dada pelo esmagamento da madeira, como dado no caso de ligações madeira-madeira. No modo de rotura com a criação de uma rótula plástica, esta ocorre na secção onde o aço e a madeira se encontram. Por equilíbrio de momentos obtém-se a Equação 4.32. O modo de rotura é apresentado na Figura 4.12.

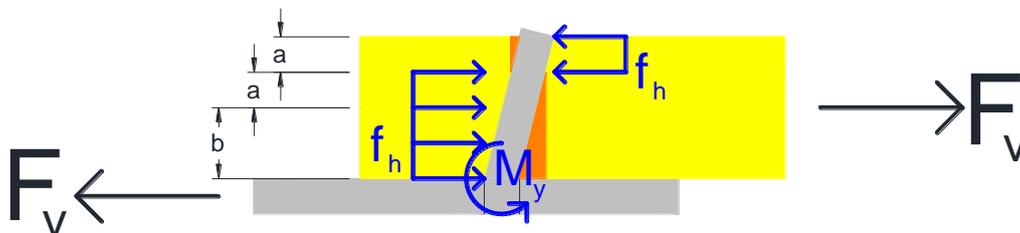


Figura 4.12 - Modo de rotura

$$M_y = f_h \cdot d \cdot \left(\frac{b^2}{2} - a^2 \right) \quad (4.32)$$

Através da relação entre a , b e t , obtém-se o valor de b , obtendo assim a capacidade resistente da ligação. Esta capacidade resistente é apresentada na Equação 4.33.

$$b = t \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_y}{f_h \cdot d \cdot t^2}} - 1 \right) \quad (4.33)$$

$$F_v = f_h \cdot b \cdot d = f_h \cdot d \cdot t \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_y}{f_h \cdot d \cdot t^2}} - 1 \right)$$

No modo de rotura com a formação de duas rótulas plásticas, estas ocorrem no elemento estrutural de madeira e na secção que une o aço e a madeira, como apresentado na Figura 4.13. Por equilíbrio de momentos obtém-se a Equação 4.34.

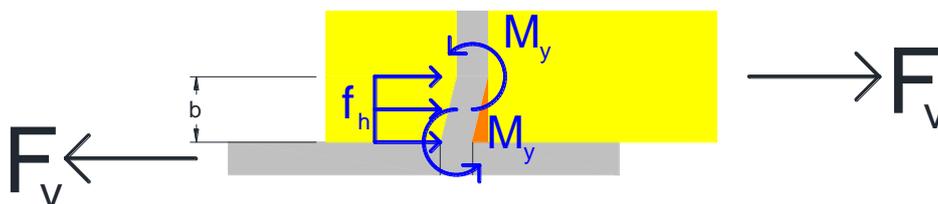


Figura 4.13 - Modo de rotura

$$2 \cdot M_y = f_h \cdot d \cdot \frac{b^2}{2} \quad (4.34)$$

Directamente desta equação é possível saber o valor de b e da capacidade resistente da ligação, como apresentado na Equação 4.35.

$$b = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_y}{f_h \cdot d}} \quad (4.35)$$

$$F_v = f_h \cdot b \cdot d = 2 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d}$$

Nos casos em que existe uma rótula plástica formada numa secção do conector no elemento estrutural de madeira, o Eurocódigo 5 considera um aumento de capacidade resistente da ligação de 15%, como no caso das ligações madeira-madeira.

Também nas ligações aço-madeira pode existir mais do que um plano de corte. O comportamento da ligação é diferente se as placas de aço estiverem entre elementos estruturais ou fora, e por isso também os modos de rotura são diferentes. No entanto, a capacidade resistente de cada um dos modos de rotura resultantes são iguais aos de um plano de corte, como no caso das ligações madeira-madeira, uma vez que as ligações são simétricas. O Eurocódigo 5 faz a mesma consideração de um aumento de 15% no caso equivalente a uma rótula plástica numa secção do conector no elemento estrutural de madeira.

Quando as placas de aço são usadas numa ligação entre elementos estruturais, têm como objectivo aumentar a capacidade da ligação de resistir ao fogo uma vez que a ligação está protegida. Neste caso, não interessa se a placa de aço é fina ou espessa, uma vez que os modos de rotura da ligação serão os mesmos. No entanto é necessário garantir que o conector não esmaga o aço quando uma força é aplicada na ligação levando-a à rotura.

É ainda possível fazer uso de chapas metálicas com o intuito de reforço numa estrutura. Através do seu posicionamento em zonas estratégicas é possível aumentar a capacidade resistente da madeira à compressão perpendicular ao fio: por ser mais rígida que a madeira, uma chapa metálica oferece um caminho alternativo para a transmissão de cargas da ligação. É ainda possível aumentar a capacidade resistente da madeira à tracção perpendicular ao fio prevenindo a rotura frágil de uma ligação, em bloco ou por separação dos fios da madeira.

A Figura 4.14 apresenta uma ligação na estrutura da cobertura do velódromo Ballerup na Dinamarca. Essa ligação é feita recorrendo a parafusos de porca e chapas metálicas. No dimensionamento da estrutura, não foi considerada a redução da secção que ocorreu devido à existência dos conectores. Essa não consideração levou ao mau dimensionamento da estrutura, que acabou por colapsar. Na parte a), é apresentada a ligação antes do colapso. Na parte b) é apresentada a ligação após o colapso.



Figura 4.14 - Colapso de uma ligação [adaptado de Kliger, 2013]

4.4 – EXPRESSÕES E MODOS DE ROTURA DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO 5

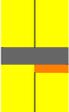
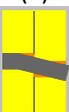
O Eurocódigo 5 considera que uma ligação recorrendo a conectores do tipo cavilha, estes têm de ter uma penetração mínima no elemento estrutural a ligar de oito vezes o diâmetro do conector.

De seguida é apresentado um conjunto tabela e gráfico correspondente a cada tipo de ligação: entre dois elementos estruturais de madeira e entre um elemento estrutural de madeira e aço com diferentes planos de corte. Cada tabela apresenta as expressões e respectivos modos de rotura de uma ligação. As expressões apresentadas não contemplam a força de ancoragem.

Os gráficos apresentados a seguir a cada tabela ilustram a capacidade resistente da ligação aparafusada para cada modo de rotura variando a espessura do elemento estrutural de madeira. As características dessa ligação utilizadas no exemplo são: elementos estruturais de madeira do tipo C30 com um valor característico do peso volúmico de 380kg/m^3 e parafusos com um diâmetro de 12mm e uma tensão última de 600MPa cujo furo foi pré-furado. No caso das ligações madeira-madeira a espessura de um elemento estrutural é de 50mm, variando a espessura do outro. A linha a preto representa a capacidade resistente da ligação, ou seja a menor das capacidades resistentes de cada modo de rotura.

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações madeira-madeira com um plano de corte estão apresentados na Tabela 4.1. A capacidade resistente da ligação é apresentada no Figura 4.15.

Tabela 4.1

$F_v = f_{h1} \cdot t_1 \cdot d$	
$F_v = \beta \cdot f_{h1} \cdot t_2 \cdot d$	
$F_v = \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_1}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right)$	
$F_v = 1,05 \cdot \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right)$	
$F_v = 1,05 \cdot \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_2}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right)$	
$F_v = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \beta \cdot M_y \cdot f_{h1} \cdot d}{1 + \beta}}$	

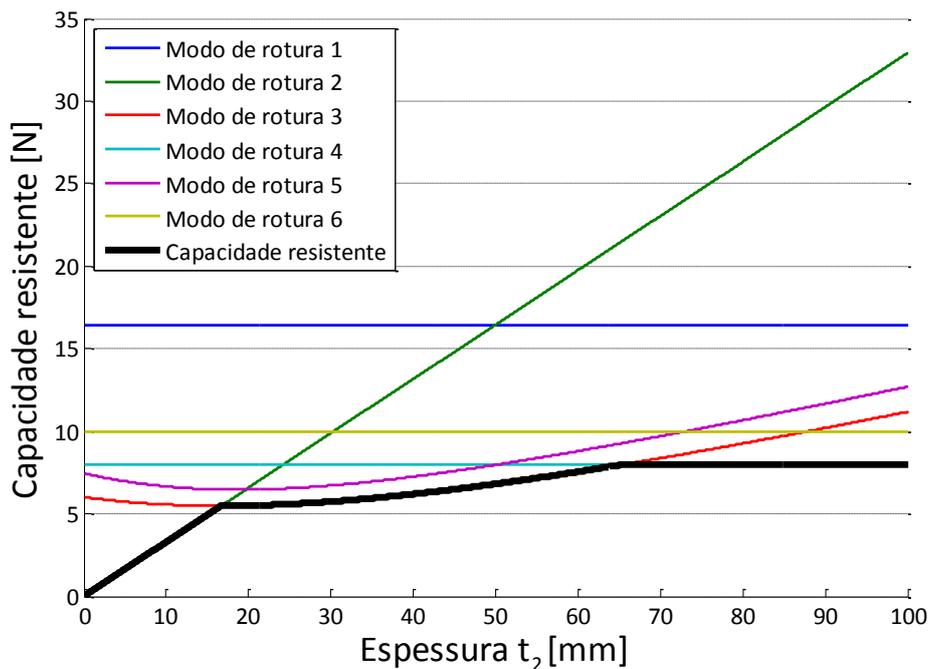
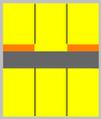
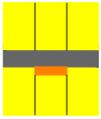
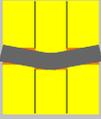
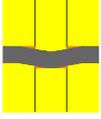


Figura 4.15 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira com um plano de corte para $t_1=50\text{mm}$

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações madeira-madeira com dois planos de corte estão apresentados na Tabela 4.2. A capacidade resistente da ligação é apresentada na Figura 4.16.

Tabela 4.2

$F_v = f_{h1} \cdot t_1 \cdot d$	 <p>(1)</p>
$F_v = 0,5 \cdot \beta \cdot f_{h1} \cdot t_2 \cdot d$	 <p>(2)</p>
$F_v = 1,05 \cdot \frac{f_{h1} \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_y}{f_{h1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right)$	 <p>(3)</p>
$F_v = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \beta \cdot M_y \cdot f_{h1} \cdot d}{1 + \beta}}$	 <p>(4)</p>

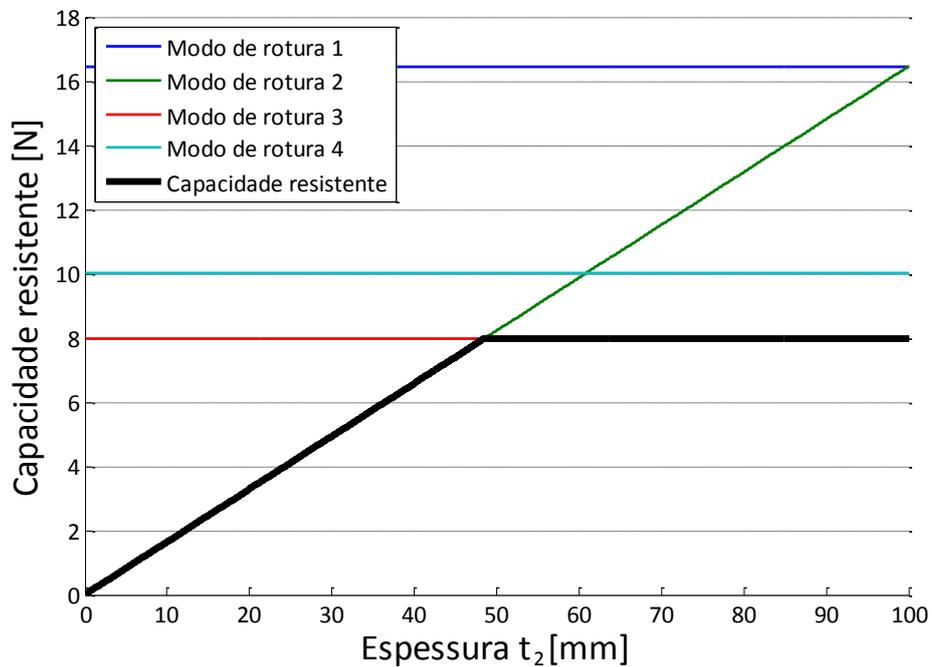
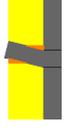
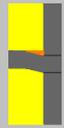


Figura 4.16 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação madeira-madeira com dois planos de corte para $t_1=50\text{mm}$

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações aço-madeira com um plano de corte para uma placa de aço espessa estão apresentados na Tabela 4.3. A capacidade resistente da ligação é apresentada no Figura 4.17.

Tabela 4.3

$F_v = f_h \cdot t \cdot d$	 (1)
$F_v = f_h \cdot d \cdot t \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_y}{f_h \cdot d \cdot t^2}} - 1 \right)$	 (2)
$F_v = 2,3 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d}$	 (3)

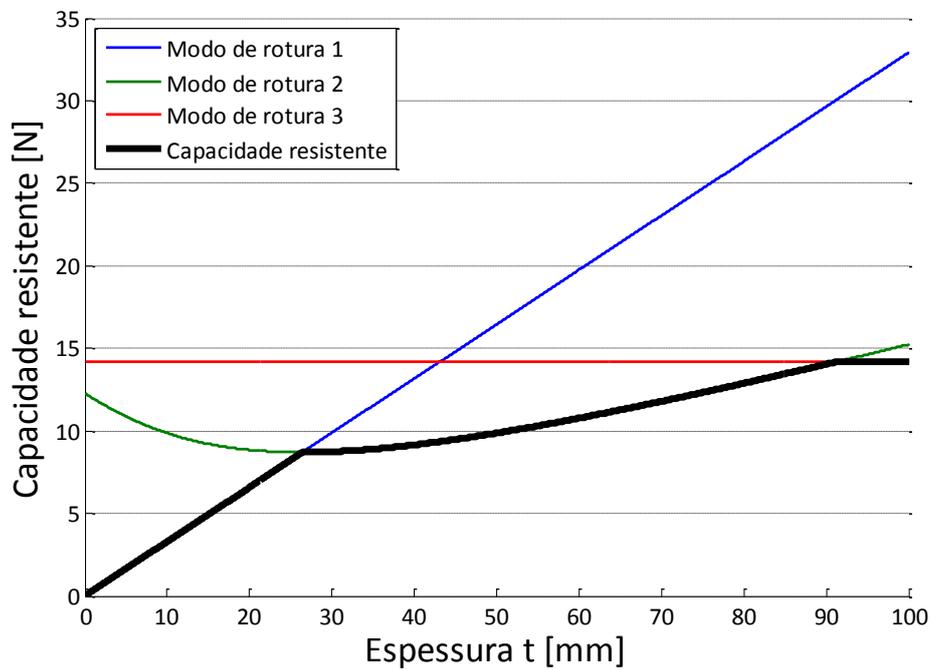


Figura 4.17 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placa espessa com um plano de corte

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações aço-madeira com um plano de corte para uma placa de aço fina estão apresentados na Tabela 4.4. A capacidade resistente da ligação é apresentada na Figura 4.18.

Tabela 4.4

$F_v = 0,4 \cdot f_h \cdot d \cdot t$	 (1)
$F_v = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_h \cdot d}$	 (2)

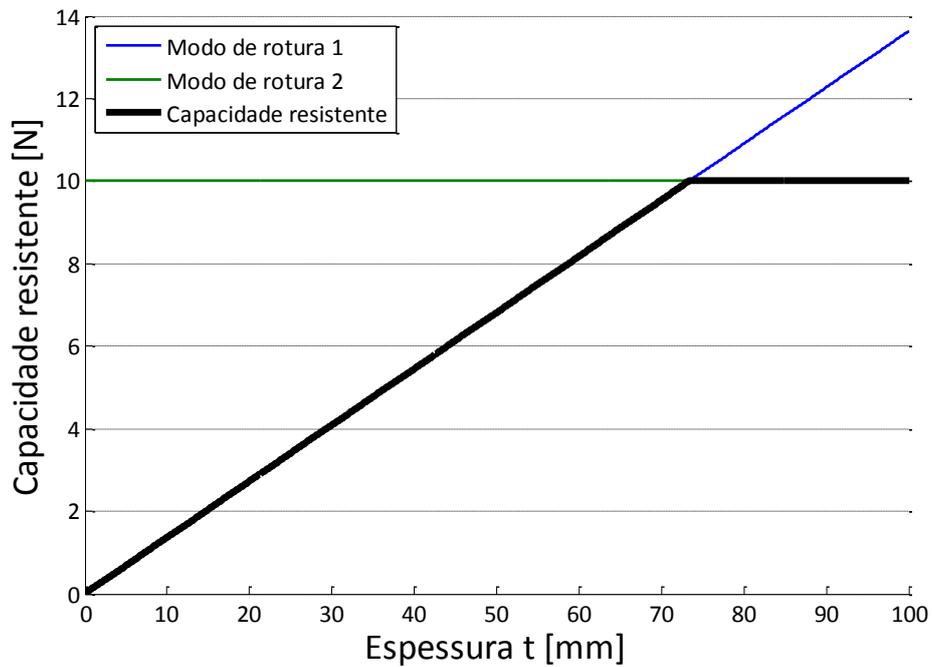
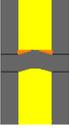


Figura 4.18 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placa fina com um plano de corte

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações aço-madeira com dois planos de corte para duas placas de aço espessas estão apresentados na Tabela 4.5. A capacidade resistente da ligação é apresentada no Figura 4.19.

Tabela 4.5

$F_v = 0,5 \cdot f_h \cdot t \cdot d$	 (1)
$F_v = 2,3 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d}$	 (2)

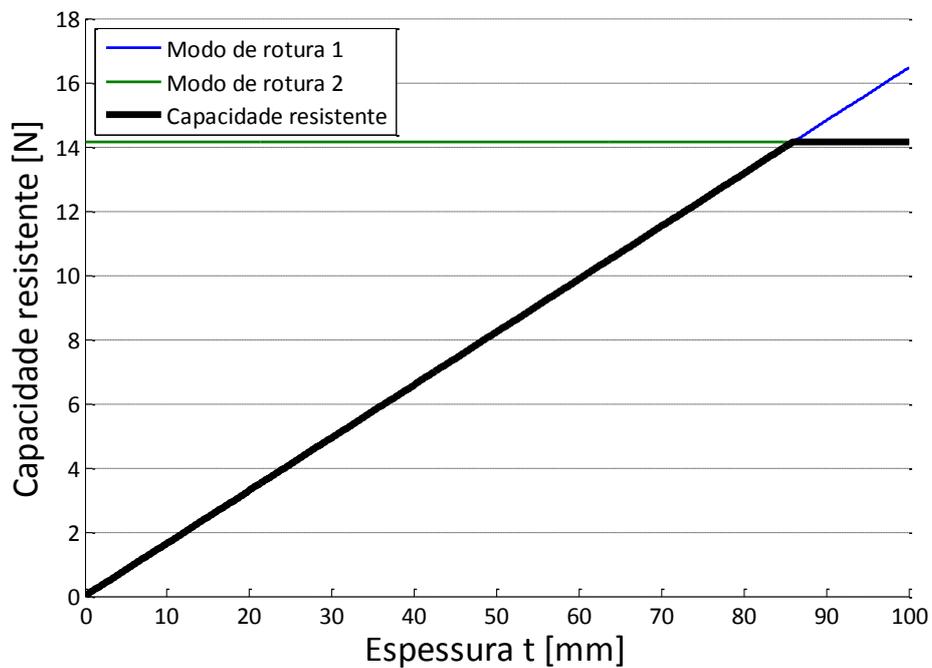


Figura 4.19 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placas espessas com dois planos de corte

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações aço-madeira com dois planos de corte para duas placas de aço finas estão apresentados na Tabela 4.6. A capacidade resistente da ligação é apresentada no Figura 4.20.

Tabela 4.6

$F_v = 0,5 \cdot f_h \cdot t \cdot d$	 (1)
$F_v = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_h \cdot d}$	 (2)

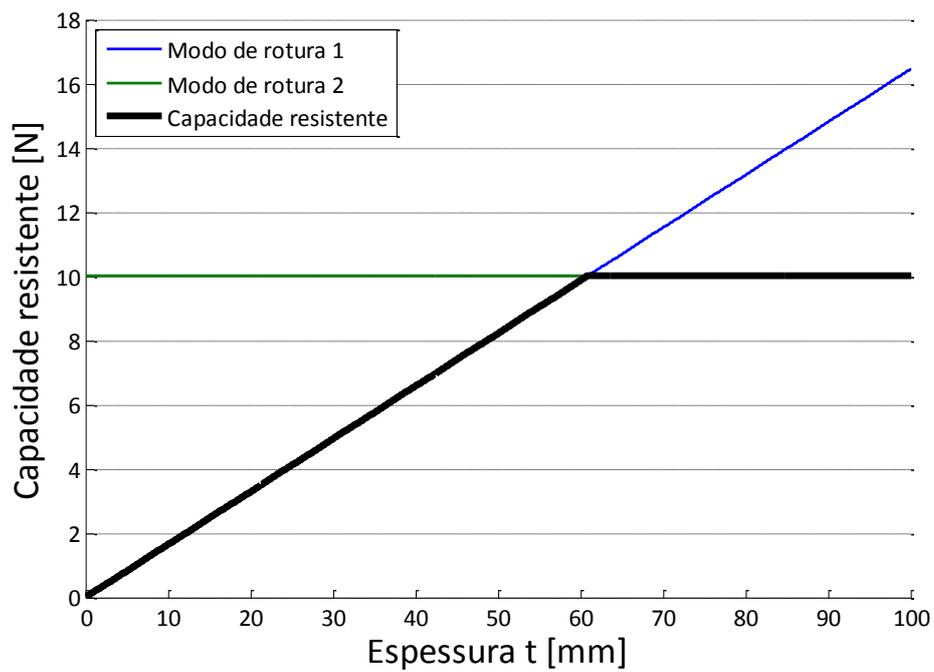


Figura 4.20 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira para placas finas com dois planos de corte

As expressões e os modos de rotura relativos a ligações aço-madeira com dois planos de corte para uma placa de aço estão apresentados na Tabela 4.7. A capacidade resistente da ligação é apresentada na Figura 4.21.

Tabela 4.7

$F_v = f_h \cdot t \cdot d$	 (1)
$F_v = f_h \cdot d \cdot t \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_y}{f_h \cdot d \cdot t^2}} - 1 \right)$	 (2)
$F_v = 2,3 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d}$	 (3)

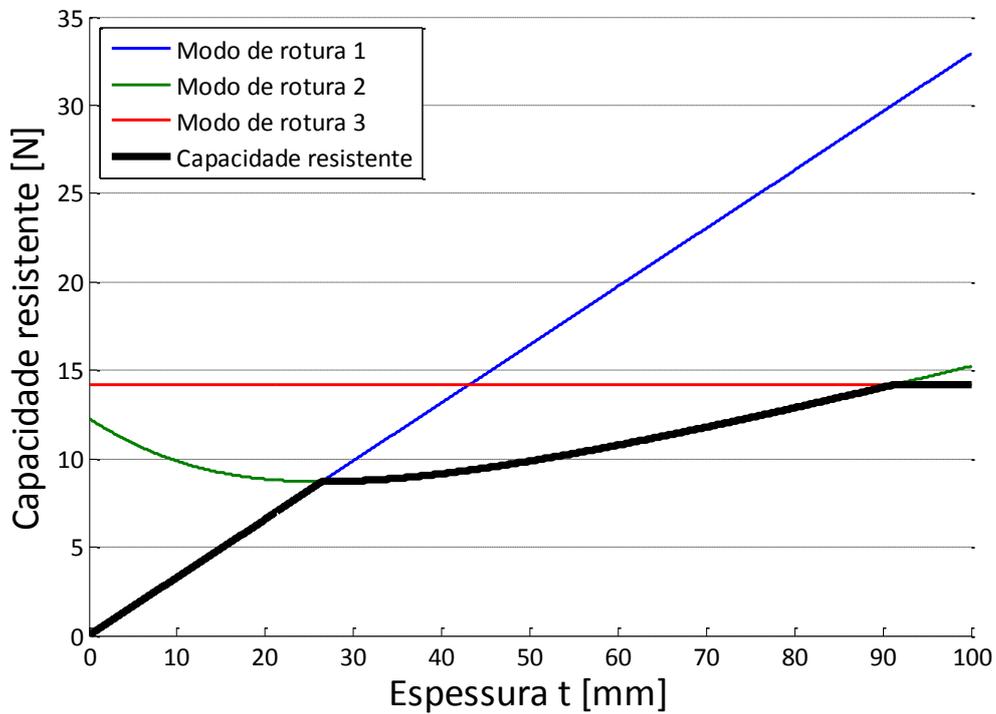


Figura 4.21 - Gráfico da capacidade resistente de uma ligação aço-madeira com dois planos de corte

4.5 – LIGAÇÕES COM MÚLTIPLOS CONECTORES

Para melhor repartir a força numa ligação, normalmente são usados vários conectores. O efeito gerado pelo uso de mais do que um conector influencia o desempenho da ligação devido à acumulação de tensões resultantes de cada conector no elemento estrutural. Para evitar uma excessiva tensão, é necessário garantir espaçamentos mínimos entre conectores e entre conectores e as faces extremas do elemento estrutural, e analisar a ligação como um conjunto de conectores.

4.5.1 – ESPAÇAMENTOS MÍNIMOS

O espaçamento mínimo entre conectores tem como objectivo evitar que o efeito de grupo no elemento estrutural de madeira leve a ligação à rotura. Devido às distintas capacidades da madeira paralela e perpendicularmente à direcção do fio, também os espaçamentos mínimos numa direcção e na outra são diferentes. Em relação às distâncias aos bordos e topos do elemento estrutural, estas dependem do ângulo formado entre a força aplicada e a direcção do fio e da solicitação ou não desses bordos e topos ao carregamento.

A Figura 4.22 representa de que modo é que o espaçamento mínimo contribui para a atenuação do efeito de grupo. A redução do espaçamento entre conectores provoca uma acumulação de tensões perpendiculares ao fio, por não conseguir mobilizar toda a força transmitida na madeira entre conectores. A imagem representa uma força aplicada na direcção do fio e as tensões que daí advêm. Na parte a) os conectores estão representados respeitando o espaçamento mínimo. Na parte b) o espaçamento mínimo entre conectores não é respeitado.

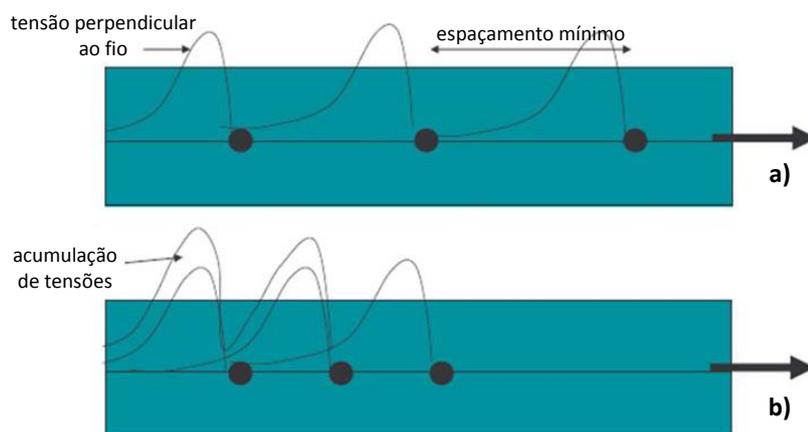


Figura 4.22 – Efeito de grupo [adaptado de Kliger, 2013]

O Eurocódigo 5 fornece informações para os espaçamentos mínimos para cada conector do tipo cavilha. Para isso definiu os seguintes espaçamentos:

- o espaçamento a_1 é a distância paralela ao fio entre dois conectores;
- o espaçamento a_2 é a distância perpendicular ao fio entre dois conectores;
- o espaçamento $a_{3,t}$ é a distância ao topo carregado e o espaçamento $a_{3,c}$ ao topo não carregado;
- o espaçamento $a_{4,t}$ é a distância ao bordo carregado e o espaçamento $a_{4,c}$ ao bordo não carregado.

Porque a_1 e a_2 não dependem do ângulo que a força aplicada faz com a direção do fio (α), estes não podem ser definidos em função deste parâmetro. No entanto os outros espaçamentos têm de ser. O espaçamento a_{3t} acontece com α entre -90° e 90° . O espaçamento a_{3c} com α entre 90° e 270° . O espaçamento a_{4t} acontece com o ângulo α entre 0° e 180° e o espaçamento a_{4c} com α entre 180° e 360° .

Os espaçamentos mínimos estão apresentados na Figura 4.23. Na parte a) são definidos os espaçamentos entre conectores, estando marcado na figura com o número 1 os conectores e com o número 2 a direção do fio. Na parte b) são definidas as distâncias aos topos e bordos carregados ou não.

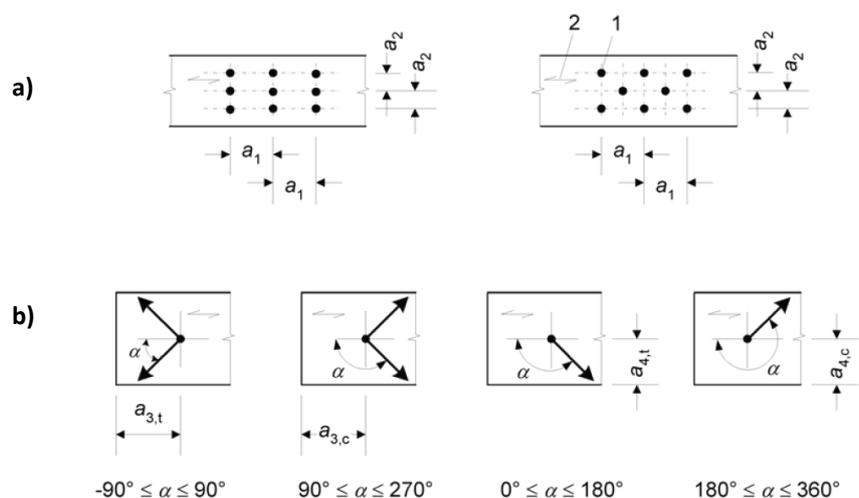


Figura 4.23 - Espaçamentos mínimos entre conectores [Eurocódigo 5, 2004]

Para o caso de pregos aplicados em furos que não foram pré-furados, os espaçamentos mínimos entre conectores dependem do valor característico do peso volúmico da madeira, do ângulo entre a força e a direção do fio (α) e do diâmetro do conector (d). Estes valores estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8

Espaçamento	$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$
a_1	$d < 5 \text{ mm}: (5 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}: (5 + 7 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(7 + 8 \cdot \cos \alpha) \cdot d$
a_2	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$
a_{3t}	$(10 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(15 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$
a_{3c}	$10 \cdot d$	$15 \cdot d$
a_{4t}	$d < 5 \text{ mm}: (5 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}: (5 + 5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}: (7 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}: (7 + 5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
a_{4c}	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$

Se o furo onde são aplicados os pregos for pré-furado as distâncias mínimas dependem apenas do ângulo entre a força e a direção do fio (α) e do diâmetro do conector (d), como apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9

Espaçamento	Eurocódigo 5
a ₁	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$
a ₂	$5 \cdot d$
a _{3t}	$(3 + \sin \alpha) \cdot d$
a _{3c}	$7 \cdot d$
a _{4t}	d < 5mm: $(3 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ d ≥ 5mm: $(3 + 4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
a _{4c}	$3 \cdot d$

Para o caso de cavilhas, estas distâncias dependem do ângulo entre a força e a direcção do fio (α) e do diâmetro do conector (d). Estas distâncias estão apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10

Espaçamento	Eurocódigo 5
a ₁	$(3 + 2 \cdot \cos \alpha) \cdot d$
a ₂	$3 \cdot d$
a _{3t}	máx(7 · d; 80mm)
a _{3c}	90° ≤ α < 150°: máx(3 · d; a _{3t} · cos α · d) 150° ≤ α < 210°: 3 · d 210° ≤ α < 270°: máx(3 · d; a _{3t} · cos α · d)
a _{4t}	máx(3 · d; (2 + 2 · sin α) · d)
a _{4c}	$3 \cdot d$

No caso de parafusos de porca, estes espaçamentos são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11

Espaçamento	Eurocódigo 5
a ₁	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$
a ₂	$4 \cdot d$
a _{3t}	máx(7 · d; 80mm)
a _{3c}	90° ≤ α < 150°: máx(4 · d; (1 + 6 · cos α) · d) 150° ≤ α < 210°: 4 · d 210° ≤ α < 270°: máx(4 · d; (1 + 6 · cos α) · d)
a _{4t}	máx(3 · d; (2 + 2 · sin α) · d)
a _{4c}	$3 \cdot d$

4.5.2 – EFEITO DE GRUPO

O facto de existirem mais do que um conector numa ligação faz com que estes funcionem em conjunto na transmissão das forças que actuam numa estrutura. Raramente os conectores atingem a capacidade resistente máxima em simultâneo. Isto acontece não só devido ao equilíbrio das forças na ligação (que resulta numa redistribuição dessa força pelos conectores elasticamente), como também devido a variações locais na resistência da madeira e o desalinhamento e variação do diâmetro dos furos onde os conectores são colocados.

Cramer (Cramer, 1968) e Lantos (Lantos, 1969) estudaram uma ligação onde os conectores carregados eram colocados em linha. As suas conclusões mostram que o primeiro e último conectores são os que têm uma maior força actuante, em semelhança ao que acontece com as tensões de corte numa ligação colada. Este caso faz-se notar com maior efeito nas ligações com conectores do tipo cavilha e comportamento elástico linear. Como resultado, a capacidade resistente da ligação é inferior à soma da capacidade resistente de cada conector. Blass (Blass, 1990) escreveu que no caso de comportamento plástico na ligação, devido à redistribuição de esforços, a capacidade resistente da ligação pode ser aproximada à resistência de cada conector individualmente.

Para considerar a desigualdade entre a capacidade total de uma ligação e a soma da capacidade resistente dos conectores, o Eurocódigo 5 considera um número efectivo de conectores. O número efectivo de conectores permite estabelecer a igualdade acima definida, uma vez que a soma da capacidade resistente é feita considerando não o número total de conectores mas o seu número efectivo. O número efectivo de conectores é assim, sempre igual ou menor do que o número total de conectores na secção.

O número efectivo de pregos numa ligação entre dois elementos estruturais de madeira (n_{ef}) depende do número total e distância entre conectores. A fórmula empírica presente no Eurocódigo 5 (Equação 4.36) depende de um factor k_{ef} . Este factor apresenta diferentes valores consoante o espaçamento a_1 entre pregos e em função do seu diâmetro: para espaçamentos maiores do que 14 vezes o diâmetro do prego, k_{ef} vale 1; para espaçamentos de 10 vezes o diâmetro, k_{ef} tem o valor de 0,85; para espaçamentos de 7 vezes o diâmetro, k_{ef} é igual a 0,7. No caso em que os furos para os pregos são pré-furados ainda pode ser usado um espaçamento de 4 vezes o diâmetro do prego onde k_{ef} é 0,5. Qualquer valor intermédio pode ser obtido por interpolação linear. A Figura 4.24 apresenta o número efectivo de pregos numa ligação em função do número total para diferentes espaçamentos.

$$n_{ef} = n^{k_{ef}} \quad (4.36)$$

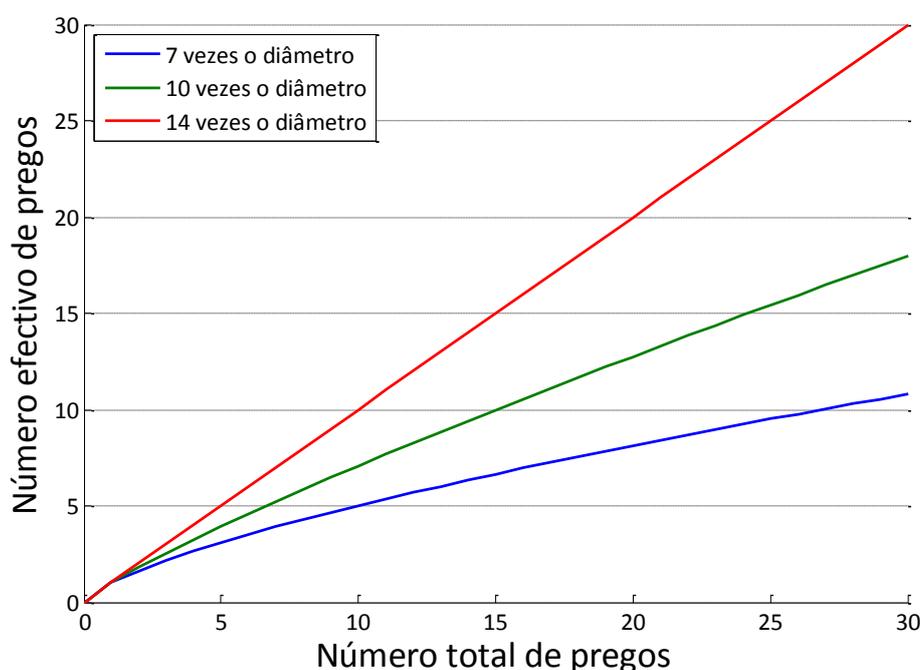


Figura 4.24 - Gráfico com o número efectivo de pregos para diferentes espaçamentos

O número efectivo de parafusos (n_{ef}) também depende do espaçamento entre conectores na direcção paralela ao fio (a_1) e do seu número total. Este espaçamento é também considerado dependente do diâmetro do parafuso (d). Para ligações aparafusadas cujo espaçamento entre conectores é maior do que 13 vezes o diâmetro pode não ser considerado o efeito de grupo: o número efectivo de parafusos é igual ao número total. No efeito de grupo para o caso de uma ligação pregada, a dependência do espaçamento entre conectores é maior do que para o efeito de grupo no caso de uma ligação aparafusada. A fórmula que o Eurocódigo 5 usa para o cálculo do número efectivo de parafusos numa ligação é a apresentada na Equação 4.37. A Figura 4.25 apresenta a variação do número efectivo de parafusos numa ligação em função do seu número total para diferentes espaçamentos.

$$n_{ef} = n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \quad (4.37)$$

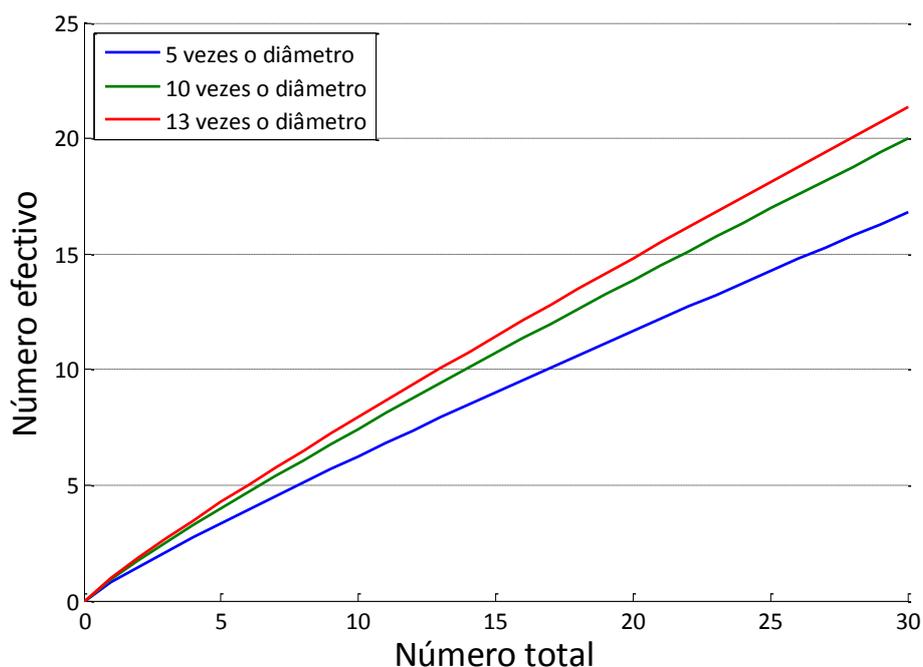


Figura 4.25 - Gráfico com o número efectivo de parafusos para diferentes espaçamentos

4.5.3 – ROTURA EM GRUPO

Os modos de rotura presentes na teoria de Johansen ocorrem para conectores do tipo cavilha com um espaçamento mínimo entre si. Prevê-se assim que a ligação ceda por esmagamento da madeira ou pela plastificação do conector (ou ambos) antes que ocorra a separação dos fios da madeira ou que a secção se parta.

Por vezes, este espaçamento mínimo não é possível uma vez que necessitaria de grandes elementos estruturais de madeira, medida essa que poderá não ser a mais económica. Assim, com o curto espaçamento entre conectores o risco de outro tipo de rotura aumenta. Uma vez que os novos possíveis modos de rotura apresentam um comportamento frágil, a segurança da estrutura fica comprometida. É assim necessária não só a verificação de cada um dos conectores individualmente, mas também da ligação como um conjunto de conectores.

Os modos de rotura possíveis devido a grupo de conectores numa ligação são quatro: pode ocorrer a rotura de todo o elemento estrutural ao longo de cada fila de conectores (rotura em fila) ou no conjunto de conectores (rotura em bloco), pode ainda acontecer que a rotura do elemento estrutural não seja em toda a sua espessura mas apenas ao nível dos conectores (rotura em ficha) ou pode dar-se ainda a separação dos fios da madeira (separação dos fios da madeira). Na Figura 4.26 são observáveis os modos de rotura em grupo.

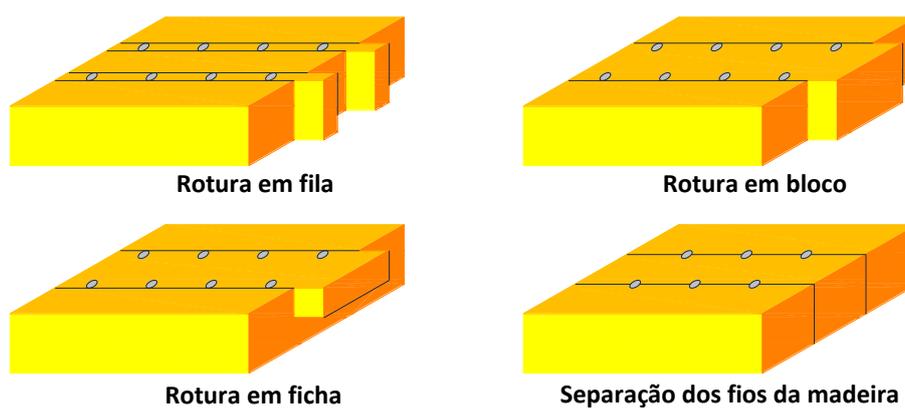


Figura 4.26 - Modos de rotura em grupo

Numa ligação com muitas filas de conectores é pouco provável que o modo de rotura de separação dos fios da madeira ocorra. Nas ligações pregadas o modo de rotura mais comum é a rotura em ficha e o modo de rotura em fila é pouco provável de acontecer uma vez que o diâmetro dos pregos é muito pequeno quando comparado com o de uma ligação aparafusada. No caso de uma ligação aparafusada, o diâmetro dos parafusos por ser mais elevado permite que o modo de rotura em fila ocorra. Os modos de rotura em fila e em bloco só acontecem para as ligações em que os conectores perfuram todo o elemento estrutural, pouco comum em ligações pregadas.

Os modos de rotura em fila, em bloco e em ficha ocorrem ao nível das faces do elemento que é arrancado. Nestes casos, uma face cede por tracção e as outras por corte. Cada elemento arrancado pode possuir até quatro faces onde a rotura ocorre: duas faces laterais onde a rotura se dá por corte, uma face traseira onde a rotura se dá por tracção e uma face inferior (apenas no caso da rotura em ficha) onde a rotura também é devida ao corte.

O modo de rotura em fila apresenta um elemento que é arrancado por cada fila de conectores. Consequentemente, este modo de rotura tem um maior número de faces a resistir a esforços do que o modo de rotura em bloco. Assim, é frequente que o modo de rotura em fila apresente uma maior capacidade resistente do que o modo de rotura em bloco.

4.6 – RIGIDEZ DE UMA LIGAÇÃO

A rigidez de uma ligação com conectores do tipo cavilha é dependente da capacidade resistente de todos os elementos intervenientes na ligação, da direcção do fio em relação à aplicação da força e da força aplicada e da sua duração.

O Eurocódigo 5 determina empiricamente a rigidez de uma ligação em serviço. A rigidez de uma ligação em serviço (K_{ser}) é dependente do valor médio do peso volúmico do elemento estrutural de madeira (ρ_m) e do diâmetro do conector (d). As unidades da rigidez da ligação são N/mm. Para o caso de parafusos cujo furo foi pré-furado, pregos e cavilhas, a rigidez de uma ligação em serviço é dada pela Equação 4.38.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad (4.38)$$

Para o caso de parafusos cujo furo não foi pré-furado, a rigidez de uma ligação em serviço é dada pela Equação 4.39.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30} \quad (4.39)$$

Quando a ligação une um elemento de madeira e um de betão, o valor médio do peso volúmico do elemento estrutural de madeira pode ser multiplicada por dois. O Eurocódigo 5 considera ainda que a rigidez de uma ligação para o estado limite último é dois terços da rigidez de uma ligação em serviço.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES

Com este trabalho pretendeu-se fazer o estudo das metodologias de análise presente na regulamentação actual relativa a ligações. Para isso foram abordados diversos tipos de ligações usadas no dimensionamento de estruturas de madeira.

Com a ideia de introduzir o material antes de referir o dimensionamento de ligações, no segundo capítulo descrevem-se as propriedades e características da madeira. A madeira é um material com uma resistência bastante elevada quando comparada ao seu peso. É por isso um material que desde sempre foi usado pelo Homem como elemento estrutural. Devido à sua anisotropia, a capacidade resistente da madeira difere consoante a direcção das tensões a que está sujeita. A madeira como elemento estrutural apresenta uma maior capacidade resistente à compressão paralela ao fio e uma menor capacidade resistente a tracção perpendicular ao fio.

No terceiro capítulo foi feita uma abordagem geral aos diversos tipos de ligações usadas em estruturas de madeira. As ligações tradicionais, para assegurarem a segurança da estrutura, apresentam frequentemente tensões a um certo ângulo com a direcção do fio. Assim, é imperativo o uso da fórmula de Hankinson no dimensionamento deste tipo de ligações. Em relação às ligações com cola, as tensões de corte transmitidas entre os elementos não são constantes. Ainda de referir que muitas vezes são usadas as ligações coladas de entalhes cruzados e em bisel. As ligações de entalhes cruzados são mais económicas uma vez que não existe um grande desperdício de material. Foram também caracterizados neste capítulo os diversos tipos de conectores metálicos.

No quarto capítulo é feita a demonstração das equações presentes no Eurocódigo 5 relativas à capacidade resistente de uma ligação. Começou-se por caracterizar os ensaios e as fórmulas empíricas fornecidas pelo Eurocódigo 5 que descrevem o comportamento dos factores intervenientes numa ligação: a capacidade resistente da madeira que depende do seu peso volúmico e diâmetro do conector; o momento de plastificação do conector que não corresponde ao teórico, mas sim a um obtido através de ensaios experimentais; e a uma força de ancoragem que pode ser ignorada no dimensionamento de uma ligação. De seguida, as equações que definem a capacidade resistente de ligações entre elementos estruturais de madeira e um elemento estrutural de madeira com aço foram obtidas. Com a capacidade resistente da ligação definida foi feita uma abordagem ao funcionamento da ligação com o uso de mais do que um conector. O funcionamento de uma ligação nestes termos é bastante semelhante ao funcionamento de uma ligação colada em termos de distribuição das forças, uma vez que a força actuante nos conectores exteriores é maior do que a actuante nos conectores interiores à ligação. Para terminar este capítulo abordou-se o modo como o Eurocódigo 5 calcula a rigidez de uma ligação.

REFERÊNCIAS

- Blass, H.-J. (1990). Load distribution in nailed joints. In proceedings from the *International Council for Research Innovation in Building and Construction, Working Commission CIB-W18*, paper 23-7-2, Lisbon, Portugal, September 1190.
- Blass, H.-J. (2003). Joints with Dowel-Type Fasteners. *Timber Engineering*. Larsen H.J. and Thelandersson S. Eds., Wiley & Sons, ISBN 0-470-84469-8.
- Cramer, C.O. (1968). *Load Distribution in Multiple-Bolt Tension Joints*. Journal of the Structural Division 94(ST5).
- Crocetti, R., Johansson, M., Johnsson, H., Kliger, R., Mårtensson, A., Norlin, B., Pousette, A. & Thelandersson, S. (2011). *Design of timber structures*. Swedish Wood.
- EN 383 (1993). Timber Structures – Test methods – Determination of embedding strength and foundation values for dowels type fasteners.
- EN 408 (1995). Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.
- EN 1382 (1999). Timber Structures – Test methods – Withdrawal capacity of timber fasteners.
- EN 1383 (1999). Timber Structures – Test methods – Pull-through resistance of timber.
- EN 1995-1-1 (2004). Eurocode 5: Design of timber structures. CEN Brussels.
- EN 14358 (2006). Timber Structures – Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample.
- Gustafsson, P.-J. & Serrano, E. (2001). *Glued-In Rods for Timber Structures (GIROD): Final Report for WP1 – Development of a calculation model*, Lund University.
- Johansen, K.W. (1949). *Theory of Timber Connections*. International Association of Bridge and Structural Engineering, volume 9.
- Kliger, R. (2013). Documentos das aulas da disciplina de Timber Engineering.
- Kuipers, J. & Van Der Put, T.A.C.M. (1982). *Betrachtungen zum Bruchmechanismus von Nagelverbindungen*. In *Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis*, Eds Ehlbeck J. and Steck G., Bruderverlag Karlsruhe, ISBN 3-87104-04905.
- Lantos, G. (1969). *Load Distribution in a Row of Fasteners subjected to Lateral load*. Wood Science 1(3).
- Negrão, J. & Faria, A. (2009). *Projecto de estruturas de madeira*. Publindústria.
- Olsson, A., Oscarsson, J., Serrano, E., Källsner, B., Johansson, M. & Enquist, B. (21 de Março de 2013). *Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation*.
Obtido de <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00107-013-0684-5>, a 8 de Junho de 2013.

Oscarsson, J., Olsson, A. & Enquist, B. (2010). *Strain fields around a traversing edge knot in a spruce specimen exposed to tensile forces.*

Obtido de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:332337/FULLTEXT01>, a 8 de Junho de 2013.

Silva, L.F.M., Lima, R.F.T., Teixeira, R.M.S. & Puga, A. (s.d.). *Closed-form solutions for adhesively bonded joints.*

Obtido de http://paginas.fe.up.pt/~em03108/Report1_Closed_form_models.pdf, a 21 de Março de 2013.

Tlustochowicz, G., Serrano, E. & Steiger, R. (2011). State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures* 44(5).