

1. INTRODUÇÃO

A construção em Portugal, principalmente em termos de estruturas de cobertura sempre teve grande procura pelo material madeira como o seu principal constituinte. A madeira é um material natural, de fácil obtenção e de boa trabalhabilidade. À medida que a construção de coberturas com estrutura em madeira foi avançando a mão-de-obra foi acompanhando, assim, juntando a mão de obra especializada e as características referidas anteriormente, a madeira foi e pode continuar a ser considerado um material de eleição na construção de estruturas de cobertura.

Como material natural a madeira apresenta determinados problemas característicos, desde as suas singularidades até às patologias apresentadas quando expostas a condições ambientais pouco adequadas.

O material madeira é dividido em duas classes principais, as madeiras resinosas e as folhosas, sendo também designada por madeira branda a madeira de resinosa e por madeira dura a madeira de folhosas.

Mais importantes que a madeira em si, ao longo da dissertação serão abordadas com maior ênfase as ligações. As principais ligações são a ligação por ensambladura e ligação por cavilhas e parafusos. Dentro destas a que terá mais importância será a ligação em corte duplo com parafuso. Será apresentada a metodologia de cálculo da ligação com base no EC5 e feito o cálculo exemplificado deste tipo de ligação.

Em torno da ligação em corte duplo com utilização de parafusos em aço serão ainda apresentados outros tipos de solução ou material que resista ao corte da ligação, em alternativa ao parafuso podem ser utilizadas cavilhas de aço ou até mesmo pinos de madeira dura.

Em asnas simples como estrutura de cobertura quando é utilizada contra – linha, normalmente a ligação entre esta e a perna dá-se através de ligação em corte duplo com utilização de parafuso em aço. Abordar esta situação é interessante do ponto de vista de mostrar como funcionava este tipo de mecanismo. Tendo em conta que a madeira tem um papel fundamental no mecanismo de resistência da ligação devido à sua resistência ao esmagamento pelo parafuso de aço, será assim abordada uma situação de reforço entre a peça de madeira e o parafuso, com o objectivo de reforçar a zona de contacto e transferência de carga entre o parafuso e a peça de madeira. O reforço é realizado através da inserção de um casquilho de madeira dura entre o parafuso e a peça de madeira.

Semelhante a este tipo de reforço são ainda abordados sistemas ou soluções de reforço para ligações do tipo ensambladura e ligação em corte.

1.1. MOTIVAÇÃO DA ESCOLHA

A escolha do tema da dissertação apresentada deve-se principalmente à necessidade de uma mudança no paradigma da construção em Portugal. Os tempos de construir de raiz já tiveram o seu auge e encontra-se agora a necessidade de reabilitar a construção existente, principalmente no edificado urbano das zonas mais antigas onde muitas vezes são encontradas soluções arquitectónicas com emprego de materiais como madeira. Principalmente em coberturas a asna de madeira sempre teve uma grande utilização e é muito comum ver deste tipo de utilização na maior parte do edificado. Devido também a uma visão mais voltada para a reutilização e cuidado com a utilização de materiais tendo em conta o seu impacte ambiental a madeira toma um lugar importante, tratando-se de um material natural, renovável e com múltiplas aplicações. Para além de tudo a madeira é ainda um reservatório natural de CO₂ o que lhe confere um caracter ainda mais sustentável.

No ultimo semestre de mestrado no âmbito da unidade curricular de Reabilitação e Reforço de Edifícios foi abordado este tema, o que também despertou algum interesse por desenvolver mais o assunto, e como não é uma matéria muito abordada actualmente levou também à sua escolha na tentativa de fazer algo diferente.

1.2. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A dissertação insere-se num estudo do material madeira, levando em conta os vários aspectos característicos do material, serão estudadas asnas simples de madeira, como as que são encontradas em coberturas existentes. Terão especial atenção as ligações entre os vários elementos bem como o estudo mais aprofundado da ligação em corte duplo madeira – madeira com a utilização de parafuso em aço. O estudo em si terá em contas os princípios de resistência da madeira e terá como objecto de estudo uma peça em madeira que será colocada sob acção de uma força vertical colocando em tensão uma ligação dupla entre duas peças de madeira, uma vertical e outra disposta horizontalmente ligadas através de um parafuso metálico de diâmetro constante ao longo do estudo. Com isto pretende-se observar o comportamento da ligação sujeita a um esforço conhecido e tentar estabelecer uma relação entre os resultados obtidos e os cálculos efectuados. Com isto pretende-se essencialmente compreender melhor as ligações duplas em peças de madeira, nomeadamente asnas de cobertura antigas.

1.3. OBJECTIVOS

Os objectivos principais da dissertação serão o estudo do material madeira com base em artigos, livros e publicações sobre o tema. Dentro disto serão estudadas as características do

material, o tipo de estruturas mais comum em coberturas, identificação e função dos vários elementos constituintes de uma asna simples de madeira e ainda o estudo das ligações executadas neste tipo de estrutura. Como objectivos experimentais será demonstrado o calculo de uma ligação dupla com utilização de parafuso em aço e caracterizado o comportamento da ligação. Para finalizar será ainda elaborado um ensaio laboratorial no qual será introduzido um casquilho em madeira dura na ligação em corte duplo entre a peça de madeira e o parafuso em aço, com o objectivo de verificar qual a influencia de uma zona de transição ou transferência de cargas mais dura e resistente entre o aço e a madeira da estrutura.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresentada está dividida em seis capítulos. Um primeiro capítulo onde se encontram a introdução, motivação da escolha e objectivos do trabalho. Um segundo capítulo no qual serão abordadas as asnas tradicionais de cobertura em madeira onde serão abordadas as características do material, algumas vantagens da sua utilização. Num terceiro capítulo serão abordadas e caracterizadas as asnas em madeira, nomeadamente a asna simples, os vários tipos de ligações existentes e as suas características, reforço de ligações e ainda o estudo de uma ligação em corte duplo madeira – madeira com dimensionamento de uma asna existente tentando demonstrar os seus mecanismos de resistência. O quarto capítulo está reservado a ensaios, no qual será apresentada a solução a ensaiar, o estudo da ligação em corte duplo madeira – madeira com parafuso em aço e reforço através de casquilho de madeira dura. No quinto capítulo encontram-se as conclusões dos ensaios.

2. A MADEIRA EM ESTRUTURAS

2.1. EVOLUÇÃO NA UTILIZAÇÃO DA MADEIRA

A necessidade de se abrigar levou o homem a pensar em construir algum tipo de protecção. Dependendo muito da localização a utilização dos materiais era sobretudo baseada nos recursos naturais disponíveis. A madeira é um material abundante na natureza, tendo assim começado a ser utilizado preferencialmente. Com o tempo e o aprendizado as técnicas de trabalhar a madeira foram evoluindo desde a sua utilização directa nos inícios até à sua utilização extremamente preparada nos dias de hoje.

A madeira não foi só utilizada como material para construção de abrigos e mais tarde habitações mas foi também utilizada como material para produção de ferramentas, utensílios, armas, embarcações e até queimada para aquecimento.

Dependendo da localização o tipo de construção mudava muito, consoante o clima, os desastres naturais e a própria evolução. A madeira começou a ser utilizada na construção naval devido ao seu peso, é um material que flutua, logo na altura tinha características óptimas para construção de embarcações. Na construção de abrigos e mais tarde casas a madeira era conjugada com outras matérias como barro, palha, pedra e ferro. Por ser um material muito flexível a madeira permitia a construção em altura, permitindo atingir alturas de 18m de altura.

A construção em madeira data da pré-história, são encontradas construções ou vestígios de tipos de construção em madeira com milhares de anos. Alguns exemplos de construção em madeira da antiguidade são a cabana, formada por uma estrutura de ramos e canas, com uma cobertura feita com recurso a folhas com argila, colmo ou peles de animais. A palafita, também conhecida por hórreo, habitação lacustre de madeira, é um tipo de construção suspensa em cima de pilotis ancorados no fundo de lados ou zonas pantanosas. E os terramares, descobertos em Itália, são cabanas de madeira e argila em locais pantanosos.

Ainda hoje em dia é possível encontrar estes tipos de construção, como por exemplo em Espanha, onde se podem encontrar hórreos, na região da Galiza, como é mostrado na figura seguinte, a sua principal função era proteger contra o ataque de animais selvagens e protecção contra agentes atmosféricos.

As estruturas que são utilizadas na construção actual são baseadas no princípios estruturais praticados neste tipo de construção, em que eram utilizados ramos e pequenos troncos que faziam de armação, posteriormente cobertos por folhas ou cascas de árvores. As ligações também já tinham alguma importância, na altura recorria-se principalmente a cordas tecidas com as fibras das folhas, estas ligações eram muito flexíveis, tornando a estrutura bastante resistente a ventos fortes e tempestades.

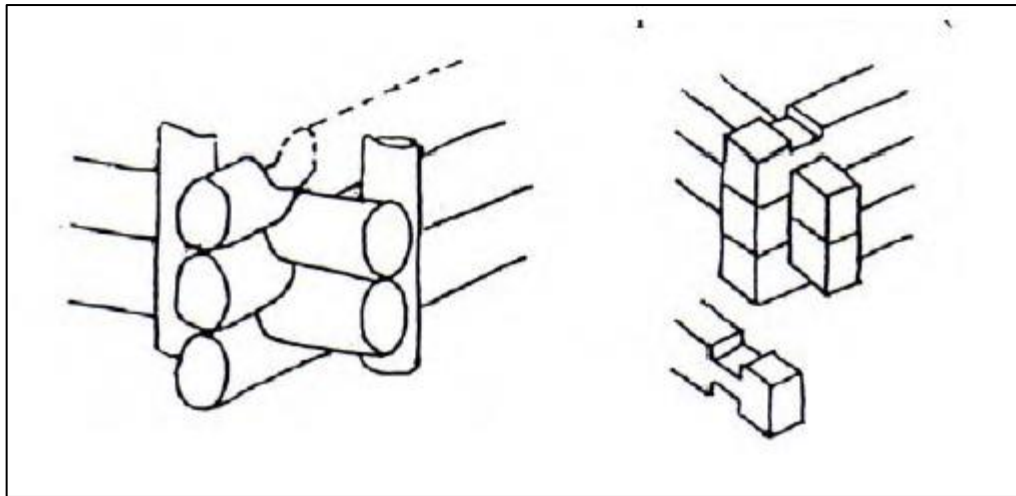


Figura 1 – Construção em troncos de madeira. [LEONARDO DA VINCI, 2008];

Na Europa foi durante a Idade do Bronze que começou a ser praticada a construção em madeira. Eram adoptados sistemas de troncos devido à dificuldade de trabalhar e cortar peças de madeira maiores tais como pranchas por falta de ferramentas. Era utilizado o castanho como material de construção. Foi neste século que se iniciou o processo de triangulação de peças de madeira, conhecido como Cruzes de Santo André, técnica que trazia um nível de estabilidade mais elevado devido ao contraventamento imposto.

Devido à precariedade das estruturas de madeira ocorreu por vezes a sua substituição por materiais como pedra, um material mais resistente aos elementos. Na arquitectura gótica e na românica é encontrada esta situação, nas quais, palácios urbanos e moradias foram inicialmente construídas em madeira, mas procurando maior conforto e requinte a madeira foi substituída por pedra.

Com o aparecimento de novas ferramentas e técnicas de corte mais industrializadas a construção em madeira recorrendo principalmente a troncos foi substituída por construção em madeira recorrendo a madeira serrada, na forma de tábuas e barotes de secção rectangular, tornando a construção em si mais resistente aos elementos devido a permitir linhas mais direitas e assim maior estanquicidade e estabilidade às construções.

Na Idade Moderna com a evolução e maior conhecimento dos materiais e experiência dos carpinteiros a construção em madeira foi erguida até patamares que permitiam a construção em altura até cerca de 5 a 6 pisos. São encontrados edifícios com estas dimensões, construídos

em madeira destas épocas, idade média e Renascimento. Esta construção resistia tanto ou mais que a construção em pedra ou tijolos. Em Portugal depois do grande sismo de 1755, que do qual resultou uma cidade de Lisboa destruída, foi utilizada em grande escala a madeira como material de construção. Foi adoptado um plano de reconstrução da baixa da cidade pelo engenheiro militar Manuel da Maia no qual foi utilizado o sistema de gaiolas pombalinas, tornando as paredes mais leves e flexíveis. Em caso de sismo é uma característica muito importante. O sistema de gaiolas pombalinas não é mais que um sistema de construção em madeira com elementos horizontais e verticais longos, contraventada por elementos diagonais curtos formando Cruzes de Santo André como se pode observar na figura , enchidas com alvenaria de pedra.

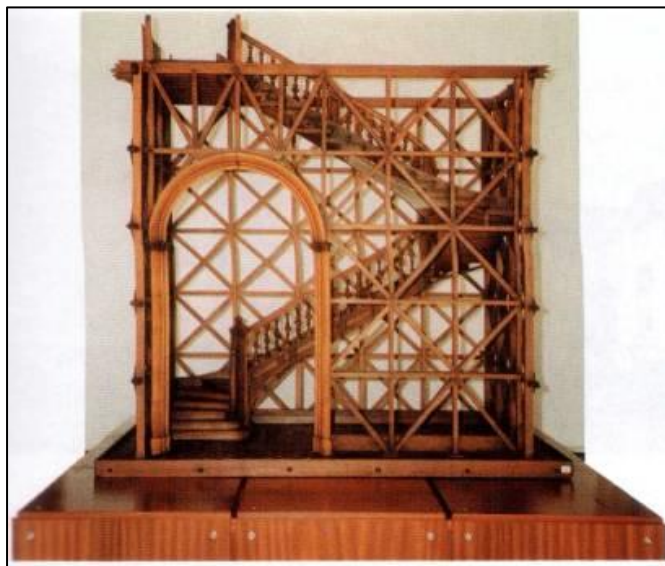


Figura 2 – Gaiola pombalina, [PINHO, F. 2000];

2.2. UTILIZAÇÃO DA MADEIRA EM ESTRUTURAS ANTIGAS (SÉCULOS XIX E XX)

A madeira é um material natural, surge na natureza na forma de árvores, existindo um grande número de espécies diferentes. No âmbito do trabalho realizado apenas interessam as espécies mais utilizadas na construção de estruturas em coberturas. As espécies mais procuradas e utilizadas eram o Pinho, o Castanho e o Eucalipto. Eram as espécies mais utilizadas porém o eucalipto seja uma madeira mais utilizada nos últimos anos, ao contrário do Pinho nacional que sempre foi considerada uma madeira de eleição.

Na época, séculos XIX e XX a construção de estruturas de cobertura era feita recorrendo principalmente ao material madeira, isto porque na altura, materiais como betão armado ainda

estavam pouco estudados e as peças eram muito caras, assim como o ferro que em comparação com a madeira era muito mais caro. Não referindo apenas a questão dos custos de materiais pode ser referida também a trabalhabilidade dos mesmos. Na altura a mão de obra especializada em trabalhar a madeira era considerável, havia uma grande facilidade na sua extracção do meio natural bem como processamento da mesma até chegar a elementos para construção. A construção era simples, os materiais disponíveis e ferramentas eram tradicionais. As ligações eram realizadas apenas por contacto madeira-madeira como ensabladura simples, podendo ainda em alguns casos a aplicação de cavilhas e elementos metálicos de segurança serem adoptados. [CACHIM, P. 2007].

Assim, o material tinha muitas vantagens na sua aplicação, desde a facilidade de obtenção e custo relativamente baixo, boa trabalhabilidade, muita mão de obra especializada, experiencia na sua utilização e grande durabilidade quando utilizadas boas práticas de construção.

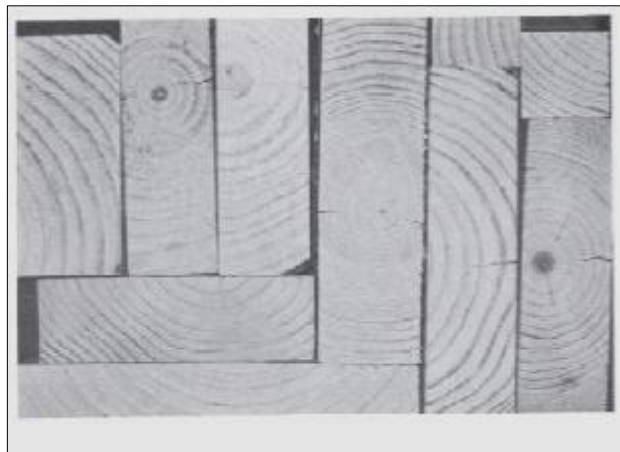


Figura 3 – Secção transversal de peças de madeira de pinho bravo classe E. [TIAGO, P.M. 2014];

2.3. UTILIZAÇÃO DA MADEIRA ACTUALMENTE

A utilização da madeira na construção actual ainda é vista com bons olhos, a madeira é um material de fácil trabalhabilidade. Embora actualmente a madeira não seja utilizada da mesma maneira. Com os anos a investigação e desenvolvimento de produtos à base de madeira tem evoluído bastante, na procura da melhoria das qualidades do material e até mesmo contornando os seus defeitos mais comuns. São inúmeros os derivados de madeira que estão à disposição no mercado actualmente. Alguns produtos de madeira para fins estruturais são:

madeira lamelada colada (“glulam”); “LVL”(“laminated veneer lumber”); “PSL”(“Parallel strand lumber”); “LSL”(“Laminated strand lumber”).



Figura 4 – Plywood. [TIAGO, P.M. 2014];

Na sua constituição encontram-se lâminas de madeira de pequenas dimensões, resultando numa maior dispersão dos defeitos levando assim a um produto final mais homogéneo.[CACHIM, P. 2007]. Em estruturas de coberturas da actualidade encontram-se algumas diferenças quando a construção é feita em madeira. As diferenças prendem-se essencialmente com o tipo de ligações empregues existindo abundancia de soluções para ligações no mercado e variado tipo de ferramentas disponíveis para realiza-las.

Podem ser ainda hoje em dia encontradas soluções idênticas às aplicadas na época. São adoptadas em reabilitação ou reconstrução de monumentos ou edifícios com valor patrimonial em que são requisitos fundamentais manter as soluções que existiam.



Figura 5 – LVL (laminated vineer lumber. [TIAGO, P.M. 2014];



Figura 6 – Gluelam. [TIAGO, P.M. 2014];

2.4. UTILIZAÇÃO DA MADEIRA NA EUROPA

A utilização da madeira nos outros países europeus tem algumas diferenças com a realidade que se viveu e ainda é vivida em Portugal. Em determinadas zonas da Europa, nomeadamente países nórdicos, a construção e a utilização de madeira não se limita a estruturas de cobertura. A madeira é utilizada na construção total ou quase total das habitações, isto desde há muitos anos, pelo que a experiência é consideravelmente superior nesse aspecto. No entanto a técnica de execução de coberturas é semelhante, alterando apenas algumas características como por exemplo a inclinação das pendentes para a não acumulação de neve. Um outro ponto a salientar é o material utilizado: de clima para clima existem espécies botânicas que são mais abundantes do que outras por estarem melhor adaptadas. No nosso país o pinho bravo é uma espécie comum e abundante. Em países nórdicos europeus existe por exemplo o pinho nórdico. São espécies parecidas mas cada uma adaptada ao ambiente no qual está inserida. Geralmente madeiras de climas mais frios são madeiras de maior qualidade. A ocorrência de invernos rigorosos leva a que a madeira apresente uma menor taxa de crescimento e apresente uma maior densidade. O cálculo da densidade da madeira é fortemente dependente do teor em humidade, o cálculo é muito importante visto a densidade da madeira poder ser relacionada com grande parte das resistências mecânicas.[CACHIM, P. 2007].

2.5. A MADEIRA E O ECOSISTEMA

A madeira surge na natureza como um material natural, sendo esta a principal razão da sua utilização ao longo de séculos. Surgir na natureza na forma de plantas lenhosas com capacidade estrutural permite que seja um material ao qual está ligado um ciclo. Da mesma maneira que o material pode ser recolhido da natureza, o mesmo pode ser cultivado e com tempo colhido de novo. O tempo necessário para o crescimento da árvore até que esta tenha um tamanho suficiente para ser abatida varia de espécie para espécie. Enquanto a o eucalipto em 10 anos tem um porte suficiente para ser abatido e utilizado como material para várias finalidades, o pinho bravo poderá levar 35 anos para ser aproveitado como madeira para mobiliário por exemplo. Actualmente a área florestal ocupada por eucalipto já ultrapassa a área de pinhal. Dados de 2010 revelam que a área de pinhal era de 600 mil hectares contra 750 mil hectares de eucaliptal.[IFN 2010]. No entanto as necessidades de madeira de eucalipto ainda não se encontram equilibradas com a produção anual. A tendência leva a que a área de plantação de eucalipto continue a aumentar em relação à área de pinhal.

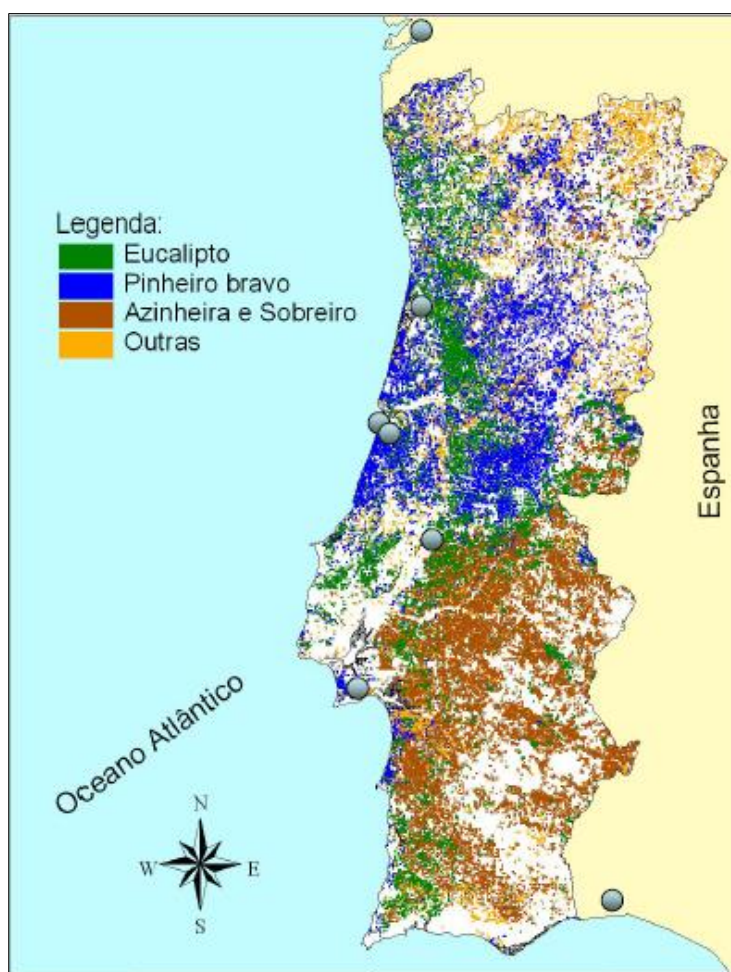


Figura 7 – Área de florestas em Portugal. [SOARES, J. 2006];

No âmbito do tema da dissertação importa referir que a reabilitação de estruturas antigas de madeira com vista à manutenção das soluções existentes contribui positivamente para a sustentabilidade. Isto porque promove a utilização de materiais como madeira de pinho bravo e até madeiras mais nobres como carvalho e castanho. A necessidade e o aumento da procura por este tipo de madeiras levaria a um estímulo no mercado. Por oposição à maioria dos materiais utilizados na construção, à base de betão e aço, que são materiais que têm associada uma grande pegada ecológica, a madeira tem uma pegada ecológica reduzida.

É um material que se renova na natureza e tem uma característica que nenhum outro material tem: a madeira enquanto árvore comporta-se como um depósito de CO₂. Através do processo de fotossíntese absorve dióxido de carbono do ar e liberta oxigénio. Esta é uma razão muito forte pela qual a utilização do material deveria ser estimulada, principalmente nos dias de hoje em que se dá uma grande ênfase a assuntos ligados à poluição, impacto ambiental e pegada ecológica.

Assim, a madeira pode ser classificada como um material “não energívoro”. Desde as suas várias utilizações. Utilizada como material de decoração, material estrutural e até mesmo como combustível para aquecimento. É uma fonte de energia renovável. Na construção sempre teve um papel muito importante, é claro que algumas das suas aplicações caíram em desuso devido ao aparecimento de novos materiais que suprimiam melhor as necessidades. No entanto no que diz respeito à inovação tecnológica têm sido sempre feitos avanços na tecnologia, principalmente no campo dos elementos prefabricados com utilização de ligantes sintéticos tais como colas e resinas.



Figura 8 – Árvore no estado natural. [TIAGO. P.M. 2014];

A madeira tem um ciclo de vida muito simples, porém devem ser respeitados alguns pontos essenciais. Não deve ser colocado de parte que a árvore da qual se aproveita a madeira leva um determinado período de tempo até que esteja pronta para o abate. Na altura do abate deve ser levado em conta que apenas pode ser abatido um determinado número de árvores, de maneira a que a restituição natural possa ser garantida e sustentável. Após o abate deve ser preparado o terreno e novamente replantado, de maneira a assegurar material para o futuro. A madeira como material segue assim o seu ciclo de vida, onde passa por um processamento e transporte que são as alturas onde é associado ao material uma maior produção de dióxido de carbono. É um material de grande durabilidade quando em situações favoráveis. Quando atinge o final da sua vida útil pode ainda ser utilizada como biocombustível ou mesmo ser decomposta em partículas e utilizada para novos materiais compósitos. Desta maneira torna-se um material que à medida que vai avançando no ciclo de vida poderá passar por diversas fases de aproveitamento da sua energia.



Figura 9 – Derivado de madeira OSB. [TIAGO, P.M. 2014];

2.6. A MADEIRA EM COBERTURAS

A madeira foi sempre um material de eleição na construção de estruturas de cobertura. Mesmo depois da generalização do uso do betão armado a solução em madeira continuou a ser utilizada, porém tendo vindo a cair progressivamente em desuso dando lugar a estruturas em betão armado, podendo ser estas maciças ou aligeiradas.

As estruturas de cobertura em madeira são geralmente compostas por vários elementos, que em conjunto funcionam como um sistema estrutural de suporte do revestimento da cobertura que geralmente é executada em telha de barro. Os vários elementos constituintes de uma

estrutura em madeira são: asnas, as quais são constituídas por elementos em compressão e elementos em tração. Elementos em tração são: linha e o pendural. Elementos em compressão são: escoras, contralinha, quando adoptada e pernas. Esta situação quando abordada a asna simples. A asna simples será a estudada ao longo da dissertação. A estrutura é ainda composta por varas, madres, ripas e fileira. Estes elementos quando correctamente aplicados e em boas condições ambientais, com um contraventamento adequado apresentam uma boa solução com grande durabilidade.



Figura 10 – Madeira em coberturas. [TIAGO, P.M. 2014];

2.7. A MADEIRA COMO MATERIAL

2.7.1. ANATOMIA

A madeira como produto da natureza apresenta características próprias de elevada importância. Importa antes de mais começar pelo estudo da anatomia do material. A madeira é estudada em três níveis diferentes. Pode assim ser dividido em três partes o estudo do material quando ao seu nível de visualização. São eles: Nível macroscópico, é a estrutura do material visível a olho nu ou mesmo com o auxílio de uma simples lupa que pode aumentar

até dez vezes a capacidade do pormenor. [CACHIM, P. 2007]; Nivel microscópico, recorrendo a aparelhos como microscópicos para aumento de imagem até 500 vezes; Nivel sub-microscopico, este pode levar o aumento de imagem até 3000 vezes. [CACHIM, P. 2007].

2.7.2. ESTRUTURA MACROSCÓPICA

A estrutura macroscópica é a estrutura da madeira visível a olho nu. A este nível pode ser identificada a seguinte estrutura: Ao centro a medula, ao redor da medula o cerne e numa parte mais periférica o borne. A medula é o lenho produzido durante o período vegetativo. Em árvores em fases de crescimento mais avançado a medula tende a apodrecer e desaparecer ficando a árvore com um espaço vazio no interior. O crescimento da árvore na direcção perpendicular ao fio é feito por fases. Cada ano constitui duas fases de crescimento distintas. Uma fase de inverno e uma fase de verão. A fase de inverno a que é atribuído o anel de crescimento de inverno é característica de um crescimento mais lento, o anel é mais escuro e denso. a fase de crescimento seguinte é a de verão, com um melhor fornecimento de nutrientes a madeira cresce mais rápido, o anel apresenta uma coloração mais clara, é mais espesso e menos denso. Em algumas espécies é ainda possível individualizar o cerne e o borne. O cerne constitui uma zona mais central no tronco, apresenta uma coloração mais escura. O borne está numa zona mais exterior à volta do cerne, apresenta uma coloração mais clara.

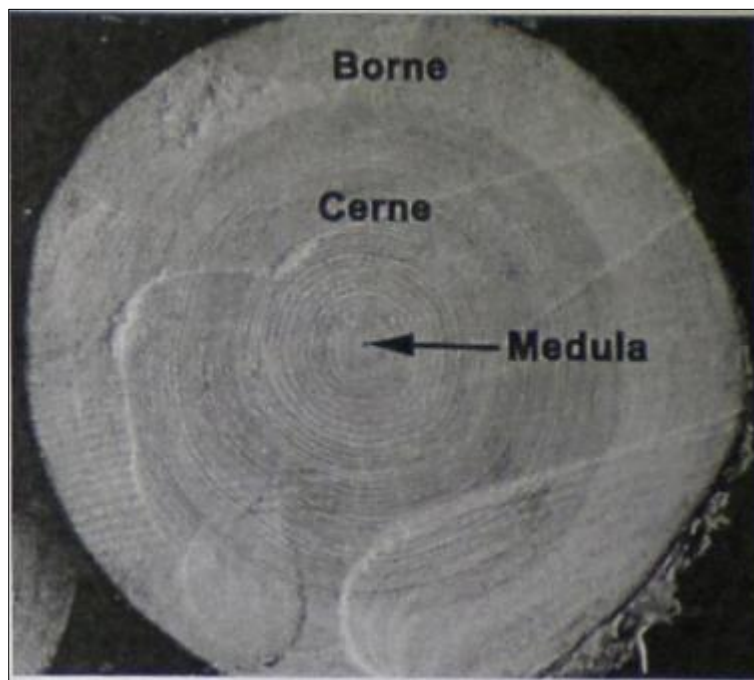


Figura 11 – Secção transversal de tronco de madeira. [DIAS, A. 2009];

2.7.3. ESPÉCIES

O reino vegetal é constituído por 17 divisões. A madeira é proveniente de duas dessas divisões. As gimnospérmicas e as angiospérmicas. Das gimnospérmicas a classe mais importante é a das coníferas e dentro das angiospérmicas a classe mais importante é a das dicotiledóneas. Existem no mundo muito mais espécies de dicotiledóneas do que coníferas. Cerca de 500 espécies de coníferas e 1500 de dicotiledóneas.[DIAS, A. 2009].

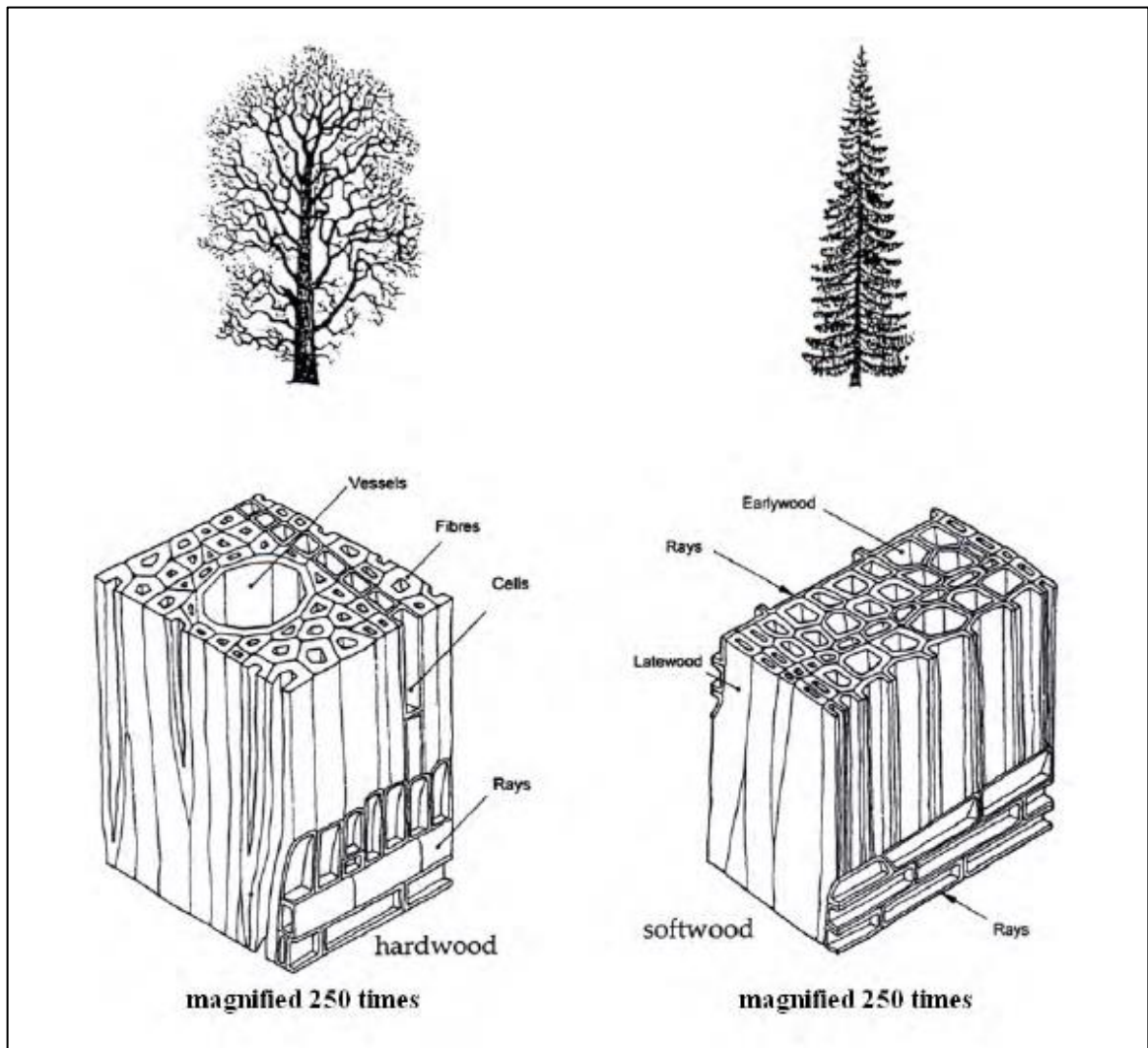


Figura 12 – Estrutura microscópica de madeira resinosa e de madeira folhosa. [LEONARDO DA VINCI, 2008];

Geralmente são designadas por resinosas as coníferas e por folhosas as dicotiledóneas. A madeira das folhosas é considerada madeira dura e a madeira das resinosas madeira branda. Em Portugal a madeira sempre teve um papel muito importante na economia. Desde a utilização na construção de edifícios, embarcações e mobiliário. Foram sempre utilizadas

várias espécies, desde madeiras mais nobres a madeiras mais vulgares com maior facilidade de obtenção e por custos mais baixos. Na construção a madeira de eleição sempre foi o pinho bravo, com inúmeras aplicações. Mas também eram utilizadas madeiras como carvalho, nogueira, castanho, casquina, choupo e pitespaine.[BRITES, R. 2011].

Madeira de pinho bravo:

Apresenta um cerne distinto vermelho-claro, o borne é esbranquiçado ou branco amarelado. Apresenta camadas de crescimento muito distintas devido à espessura do lenho de Outono.



Figura 13 – Pinho bravo.[DIAS, A. 2009];

Madeira de pitespaine:

Apresenta cerne castanho avermelhado que pode variar até castanho alaranjado, o borne é branco amarelado variando até amarela pálido. Apresenta camadas de crescimento bem marcadas. A camada de Outono é bem distinta pela sua coloração carregada.



Figura 14 – Pitespaine. .[DIAS, A. 2009]

Madeira de casquina:

O cerne apresenta uma coloração distinta de cor avermelhada-acastanhada, o borne é amarelo, apresenta assim como o pitespaine camadas bem distintas e regulares.



Figura 15 – Casquina. .[DIAS, A. 2009];

Madeira de carvalho:

Esta espécie pertence ao grupo das folhosas, é uma madeira dura, apresenta um cerne distinto de cor castanho escuro, o borne é amarelo e as camadas de crescimento são distintas.



Figura 16 – Carvalho. .[DIAS, A. 2009];

Madeira de castanho:

Apresenta um cerne distinto de cor acastanhada e por vezes rosado, o borne é branco amarelado e as camadas de crescimento são bem distintas.



Figura 17 – Castanho. .[DIAS, A. 2009]

2.8. A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

2.8.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA

A madeira é considerada como um material com boa eficiência estrutural. Porém tem uma característica que torna a sua utilização em estruturas mais limitada. É um material anisotrópico, as propriedades físicas, neste caso as resistências, variam com a direcção. Apresenta características resistentes diferentes nas várias direcções. As principais direcções na madeira são, longitudinal ou direcção do fio, transversal e radial. O comportamento na direcção transversal e radial é em muito semelhante. No entanto estes dois em relação à direcção longitudinal são muito dispares. A madeira apresenta portanto resistências de tracção e compressão nas várias direcções. Na direcção longitudinal estes dois valores são altos, habitualmente com o de tracção mais elevado, embora em Quadros de caracterização apresente geralmente um valor menor que o da compressão. Isso acontece devido principalmente à existência de defeitos na madeira, com o efeito de escala em que é maior o numero de defeitos a situação piora, sendo assim a resistência à tracção muito condicionada. Na direcção transversal os valores para compressão e tracção são muito baixos. A madeira apresenta ainda um valor de resistência ao corte muito baixo, quando comparada com outros materiais.[CACHIM, P. 2007].

2.8.2. ORTOTROPIA, LEI DE HANKINSON

A variação de características físicas na madeira segundo a orientação ou direcção, no caso das características resistentes, constitui a ortotropia do material. Tem valores resistentes diferentes

para cada direcção. No calculo de ligações como ensambladuras ou mesmo ligações de topo a topo em que pode haver até o contacto em angulo do material surgiu a necessidade da determinação da resistência. É habitualmente utilizada uma equação simples para a determinação das resistências consoante a direcção e o angulo de contacto. É chamada Lei de Hankinson. Na equação poderá ainda entrar um factor redutor de 0.8 que considera que no contacto entre duas peças de madeira poderá haver o esmagamento de material mais mole por material mais duro.[AULAS REFORÇO].

Na figura 16 na qual está representada uma ensambladura e identificadas as forças na ligação e ângulos entre peças pode ser identificado o angulo α e β para poder utilizar a seguinte expressão:

Expressão da formula de Hankinson:

$$f_{c,\alpha,k} = C_{c,\alpha} \cdot f_{c,||,k} = \frac{0.8 \cdot f_{c,\perp,k} \cdot f_{c,||,k}}{0.8 \cdot f_{c,||,k} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,\perp,k} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (1)$$

de onde:

$f_{c,\alpha,k}$: Resistência à compressão para um angulo $\alpha = \beta/2$;

$f_{c,||,k}$: Resistência à compressão paralela às fibras, valor característico;

$f_{c,\perp,k}$: Resistência à compressão perpendicular às fibras, valor característico.

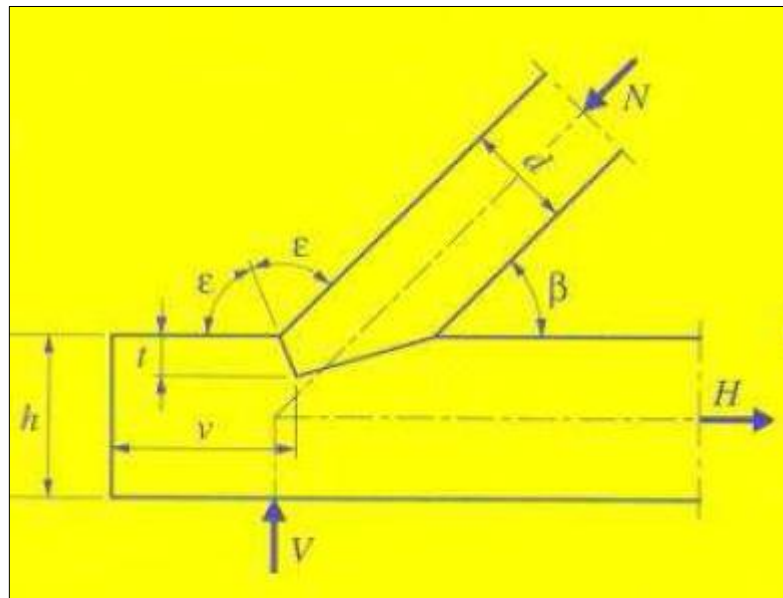


Figura 18 – Esquema representativo de ensambladura simples. [TIAGO, P.M. 2014];

2.8.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade da madeira não tem o mesmo valor para solicitações de compressão e de tracção. Os valores são diferentes, pelo que adopta-se um valor intermédio entre estes dois. Em madeira classificada estes valores podem ter variações entre os 7 e 16GPa, nas madeiras resinosas, e entre 10 e 20GPa nas madeiras folhosas, para valores na direcção paralela às fibras da madeira. Na direcção perpendicular é geralmente adoptado um valor 30 vezes inferior ao valor da direcção longitudinal.[CACHIM, P. 2007].

2.8.4. MÓDULO DE DISTORÇÃO

Não tem tão grande importância noutros materiais, mas na madeira é algo significativo. O cálculo pode ser complexo, visto não poder ser calculado pela teoria da elasticidade. Pode no entanto ser estabelecida uma relação entre o módulo de elasticidade e o módulo de distorção. Ao invés de ser calculado laboratorialmente pode-se recorrer à norma EN384:1996 para ser estabelecida a relação de $G=E/16$. [CACHIM, P. 2007].

2.9. VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES COM O TEOR DE HUMIDADE

Todos os materiais na construção variam algumas das suas características quer em termos de resistências mecânicas ou dimensões com determinados factores. A madeira não é excepção. Os principais factores que levam a alterações nas propriedades do material são o teor em água, factores ambientais como temperatura e humidade, qualidade da madeira, nomeadamente maior ou menor presença de defeitos, a aplicação de cargas e ainda o efeito de escala, que tem que ver com a dimensão das peças.

Destes o mais condicionante é o teor em água. Com o aumento do teor em água na madeira as resistências mecânicas diminuem drasticamente, podendo chegar a metade dos valores em condições óptimas de teor de humidade. A humidade tem ainda uma grande influencia no ataque biótico. Para valores superiores a 20% a probabilidade com que se dá o ataque é muito grande.[DIAS, A. 2009]. A humidade tem ainda grande influencia nas variações dimensionais, para teores em água maiores a madeira tende a aumentar o seu volume, e o contrário para teores mais baixos.

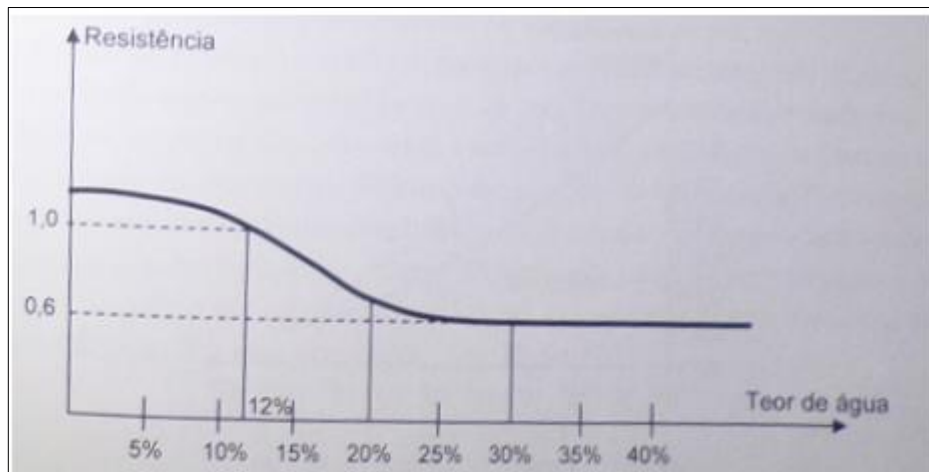


Figura 19 – Efeito do teor em água na resistência da madeira. [DIAS, A. 2009];

A temperatura tem ainda algum impacto na madeira, embora seja pouco relevante. As variações dimensionais da madeira sofrem muito pequena alteração com a temperatura. A qualidade da madeira é um factor de grande importância também. A madeira como material natural apresenta certas características como nós, orientação do fio e fendas que podem em certa maneira condicionar o comportamento mecânico das peças e até em certa medida condicionar a sua durabilidade. Os nós presentes nas peças condicionam principalmente a resistência à compressão, as fendas podem facilitar a entrada de organismos para o interior das peças, contribuindo assim para uma mais rápida degradação. Como exemplo de tronco de madeira com vários tipos de corte e deformações propícias para cada situação com a variação do teor em água da madeira depois de cortada, é apresentada o seguinte conjunto de figuras no qual é muito ilustrativo qual a deformação que irá ocorrer em determinado corte para cada zona em localização radial no tronco de madeira.

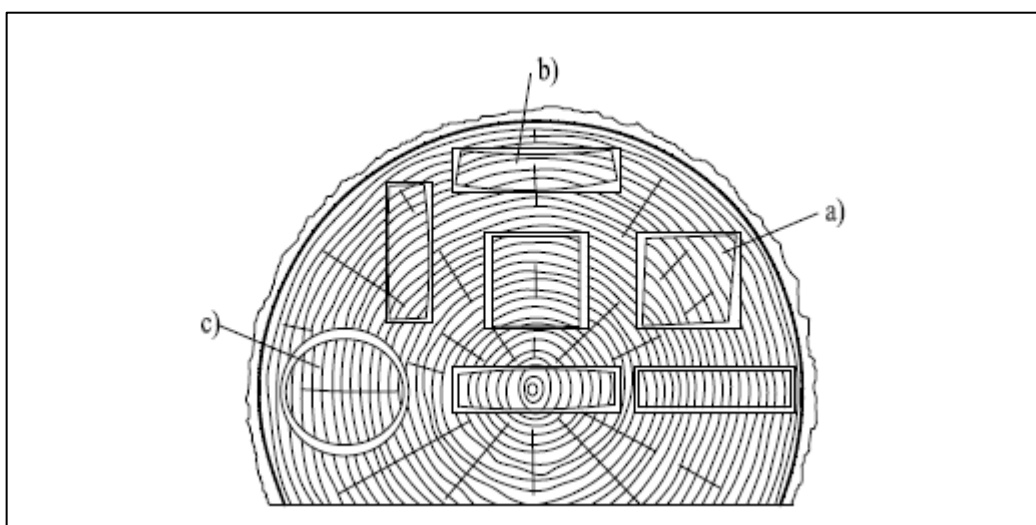


Figura 20 – Corte axial de tronco de árvore com várias localizações de corte. [LEONARDO DA VINCI, 2008];

Na figura seguinte é apresentado o resultado dos vários tipos de corte após o corte e a respectiva perda de água da madeira, para cada tipo de corte, a), b) ou c) é apresentada a respectiva deformação.

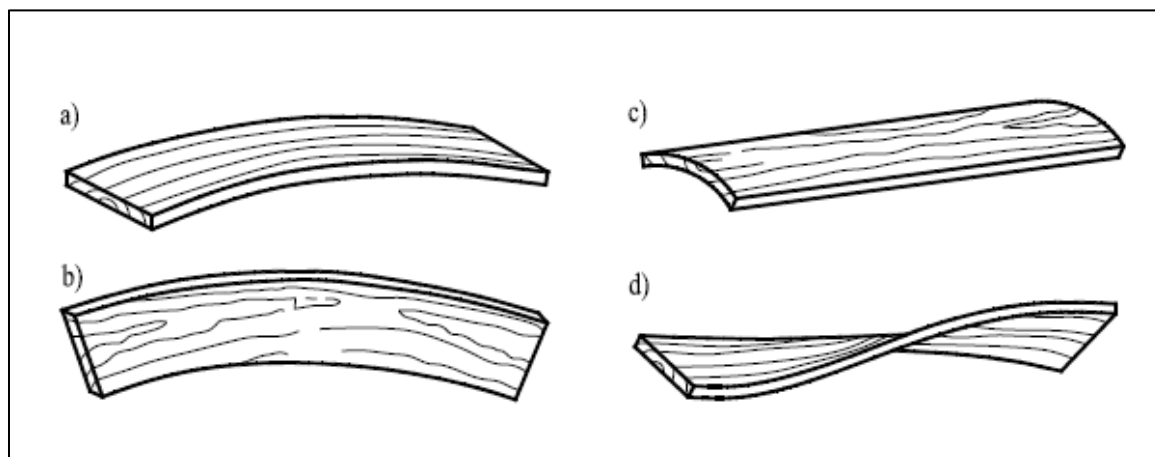


Figura 21 – Deformações por perda de água em cortes na madeira. [LEONARDO DA VINCI, 2008];

2.10. DURAÇÃO DO CARREGAMENTO

A duração de carga é levada também em consideração. A madeira é um material que apresenta fluência. A fluência consiste na deformação ou perda de resistência do elemento estrutural, quando sujeito a cargas superiores ao seu limite de elasticidade durante longos períodos de tempo. [NEGRÃO, J. 2009]. Em situações deste tipo a madeira deforma-se em regime plástico atingindo a rotura para valores de tensão mais baixos do que os indicados pelos ensaios de carga de curta duração. Em outros materiais é quase irrelevante, mas na madeira toma grande importância. De acordo com o EC5, são aplicados factores de redução, K_{mod} dependendo da duração das cargas. Para cargas de longa duração principalmente, os valores das resistências podem chegar a 60% dos valores a curto prazo. [NEGRÃO, J. 2009].

É também considerado o efeito de escala, quanto maior for o tamanho da peça menor será a tensão de rotura do material, estando isto relacionado com a presença de defeitos na peça e zonas de maior fragilidade. [CACHIM, P. 2007].

2.11. DEFEITOS DA MADEIRA, CLASSIFICAÇÃO

A madeira como material natural apresenta singularidades. São entendidos por defeitos nas peças de madeira as singularidades que esta apresenta à vista e comprometem total ou parcialmente a sua utilização. Os defeitos da madeira implicam uma diminuição das suas propriedades. Existe uma norma que descreve e agrupa os vários defeitos da madeira e os separa por quatro classes, a NP180:1962.

Os defeitos presentes nas peças de madeira são os seguintes:

Fio: o fio representa a direcção das fibras no sentido longitudinal das fibras no tronco da árvore. Por vezes o fio sofre inclinações devido a variados factores, a inclinação do fio reduz a resistência e rigidez das peças. [CACHIM, P. 2007].

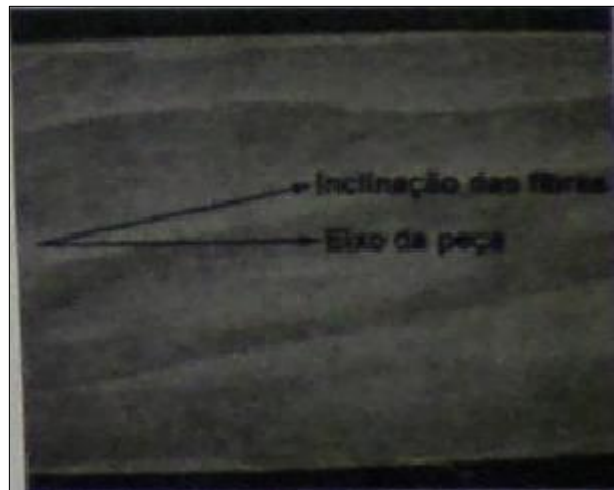


Figura 22 – Inclinação do fio em peça de madeira.[DIAS, A. 2009];

Nós: os nós constituem a inserção dos ramos no tronco da árvore. Os nós condicionam principalmente a resistência em tracção das peças de madeira. Quanto à sua classificação podem ser caracterizados em relação à sua forma, estado, aderência e a sua localização nas peças. Podem ainda ser classificados quanto ao seu agrupamento, isto é, a sua proximidade nas peças de madeira. Os nós para além de afectarem a aparência da madeira provocam ainda o desvio do fio. A resistência é tanto mais afectado quanto maior for a relação entre a área ocupada pelo nó e a área transversal da peça na qual está inserido.



Figura 23 – Peça de madeira com nó de dimensões consideráveis. [DIAS, A. 2009];

Lenho de reacção: o lenho de reacção é formado no tronco da árvore em resposta a forças exteriores, estas forças que actuam na árvore podem ser provocadas por ventos predominantes ou inclinação da árvore. A formação de lenho de reacção constitui uma zona no tronco da árvore na qual a madeira apresenta características anormais comparadas com zonas que não têm lenho de reacção.

Lenho juvenil: o lenho juvenil é a madeira composta pelos primeiros 5 a 15 anéis de crescimento.[CACHIM, P, 2007]. O lenho juvenil difere do lenho adulto por duas razões principais, o lenho juvenil tem uma espessura de parede celular inferior à do lenho adulto e o lenho adulto apresenta uma espessura superior no traqueidos. A madeira do lenho juvenil apresenta menor resistência à tracção, menor rigidez e maior retracção longitudinal. [CACHIM, P, 2007].

Empenos: acontecem ou são provocados devido à secagem e/ou mau acondicionamento das peças durante armazenamento. Não alteram directamente a resistência das peças, porém condicionam a sua utilização em obra devido a alterações no comprimento e encurvadura das peças que é muito prejudicial em peças comprimidas.

Para além destes defeitos principais ainda existem defeitos como fendas que constituem descontinuidades na madeira, bolsas de resina que aparecem em madeiras resinosas e como os nós provocam o desvio do fio.

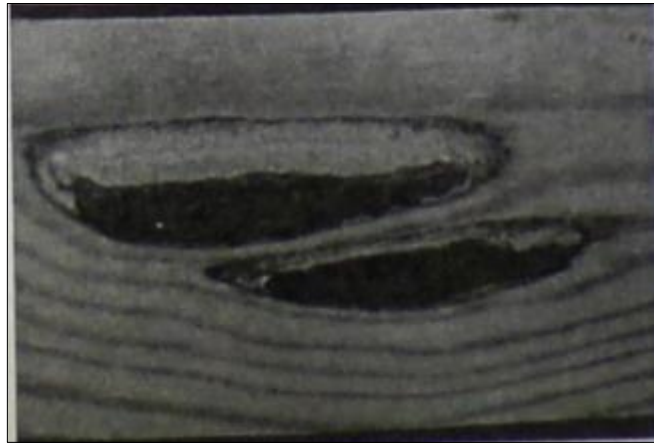


Figura 24 – Bolsas de resina.[DIAS, A. 2009];

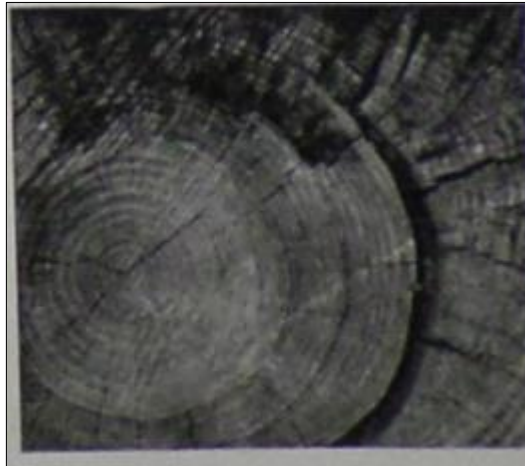


Figura 25 – Fendas na madeira.[DIAS, A. 2009];

Para que a madeira possa ser utilizada como material estrutural e aplicada na construção é necessário conhecer algumas das suas propriedades. No cálculo por estados limites mais utilizado em dimensionamento estrutural são determinados valores característicos da resistência correspondentes em geral ao percentil 5% de uma determinada amostra de peças. Desta maneira a madeira como material a aplicar na construção seria muito subaproveitada e o produto teria um custo superior devido à grande variação de características não compreendida nestes ensaios.

Surge assim a necessidade de classificar a madeira. O processo de classificação engloba métodos não destrutivos, sendo ainda necessária a classificação individual de cada peça.

A classificação da madeira engloba três componentes: A resistência, a rigidez e a densidade.[CACHIM, P, 2007].

Propriedades	Classes de Resistência					
	(Resinosas)				(Folhosas)	
	C16	C18	C24	C30	D40	D60
(Valores característicos)						
	N/mm ²				N/mm ²	
Flexão estática	16	18	24	30	40	60
Tracção paralela às fibras	10	11	14	18	24	36
Tracção perpendicular às fibras	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7
Compressão paralela às fibras	17	18	21	23	26	32
Compressão perpendicular às fibras	4,6	4,8	5,3	5,7	8,8	10,5
Corte	1,8	2,0	2,5	3,0	3,8	5,3
Módulo de elasticidade	kN/mm ²				kN/mm ²	
Paralelo às fibras						
(Valor médio)	8	9	11	12	11	17
(Valor característico)	5,4	6,0	7,4	8,0	9,4	14,3
Perpendicular às fibras (Valor médio)	0,27	0,30	0,37	0,40	0,75	1,13
Módulo de distorção (Valor característico)	0,50	0,56	0,69	0,75	0,70	1,06
Massa volúmica	kg/m ³				kg/m ³	
(Valor médio)	370	380	420	460	700	840
(Valor característico)	310	320	350	380	590	700

Figura 26 – Classificação da madeira. [LNEC - EN 338];

Os métodos de classificação da madeira dividem-se em dois grupos: Métodos de classificação visual onde se observam as peças de madeira à procura de defeitos, fazendo uma contabilização dos mesmos e excluir as peças em que a quantidade de defeitos ultrapasse um determinado limite imposto, e os métodos de classificação por ensaios, onde através de ensaios não destrutivos são obtidos valores para resistências mecânicas, rigidez e densidade.

2.12. DURABILIDADE

A madeira como material de estruturas, quando de boa qualidade e bem tratada tem uma grande durabilidade. Embora quando exposta a condições desfavoráveis e não preparada para tais situações a sua durabilidade é reduzida drasticamente. As situações desfavoráveis para a madeira acontecem quando é permitida ou facilitada a presença de insectos xilófagos e fungos que em pouco tempo conseguem destruir a estrutura da madeira. Madeira mais densa pode ser indicativo de madeira mais durável. Embora madeira mais densa geralmente apresente maior dificuldade a penetração de produtos para tratamento da mesma. [DIAS, A. 2009] Para contribuir para a durabilidade da madeira o corte e extracção do meio natural deve ser feito no inverno, isto porque é a estação em que a árvore tem menos substâncias nutritivas no seu interior visto o seu ciclo vegetativo ser quase estacionário e é quando a árvore menos cresce. Os insectos e fungos procuram madeira com mais substâncias nutritivas como açúcar e

albuminóides. É nesta época do inverno que a secagem é mais lenta, pelo que a presença de fendas por retracção será mais reduzida e de menor expressão. Os insectos procuram as fendas para depositar os ovos, e os fungos os esporos. Com a inovação nos produtos preservativos a madeira é um dos materiais estruturais com maior durabilidade. Para estender o máximo possível a sua durabilidade a madeira deve estar sempre seca e ventilada.[CACHIM, P. 2007].

Alguns aspectos que condicionam a durabilidade da madeira são:

Ataque biológico: O ataque biológico é talvez a maior condicionante das estruturas de madeira. São várias as espécies que proporcionam este tipo de ataque. A madeira é vista como alimento para estas espécies e o ataque proporciona a destruição da estrutura da madeira deixando as suas capacidades resistentes completamente afectadas, levando à necessidade de substituição. Alguns dos principais agentes biológicos são:

Fungos da podridão: atacam madeira com teor em água entre 20 e 22%, não saturada. As deficiências na construção contribuem muito para este ataque, especialmente as infiltrações e a fraca ventilação. Necessitam de oxigénio pelo que madeira submersa não é susceptível a este ataque.



Figura 27 – Madeira atacada por fungos da podridão. [CORREIA, A.M. 2014];

Térmitas subterrâneas: em Portugal é um dos principais agentes de deterioração de estruturas de madeira. Atacam principalmente madeira com teores em humidade superiores a 20% não saturada. A madeira mais susceptível a este agente é a madeira em contacto com o solo ou em pisos térreos. Depois de iniciado o ataque o mesmo pode alastrar-se pela restante estrutura.

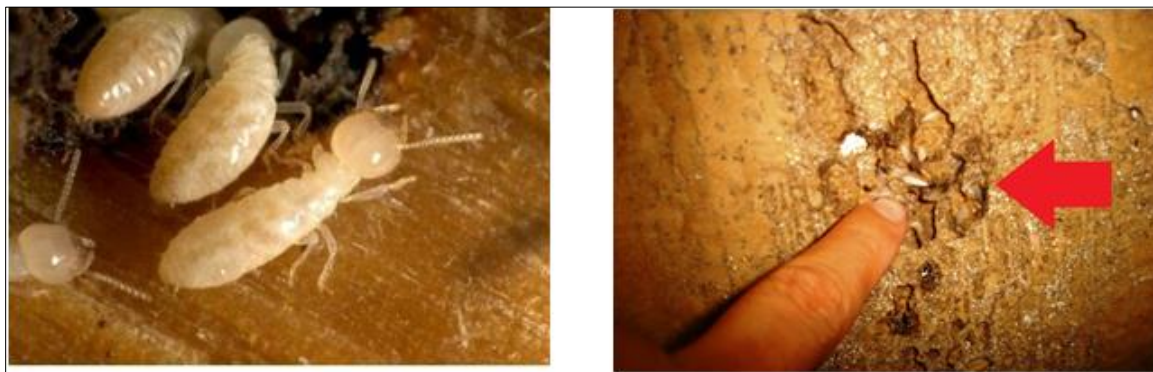


Figura 28 – Térmita subterrânea. [CORREIA, A.M. 2014]; Figura 29 – Madeira atacada por térmita subterrânea. [CORREIA, A.M. 2014];

Carunchos: os carunchos são insectos de ciclo larvar completo. Consomem a madeira construindo galerias no seu interior. O ataque por caruncho é caracterizado por deixar um pequeno orifício de saída da madeira quando o insecto sai do seu interior. Atacam madeira em interiores ou exteriores. Preferem madeira seca, embora também possam atacar madeira com alguma humidade.



Figura 30 – Madeira atacada por caruncho.[CORREIA, A.M. 2014];

Para além do ataque por parte dos agentes biológicos ainda ocorre a degradação por parte dos agentes atmosféricos, como a água e o vento. Estruturalmente não têm um impacto considerável na madeira, embora possam facilitar o ataque por parte de agentes biológicos. Ciclos de humidade e secagem podem também ocasionar a formação de fendas e empenos nas peças de madeira. Principalmente em exteriores, os agentes atmosféricos como chuva, vento, radiação ultravioleta, provocam uma ligeira erosão na madeira. Este impacto é pouco significativo, podendo a taxa de perda de material ser traduzida em cerca de 6mm a cada 100 anos.[DIAS, A. 2009].

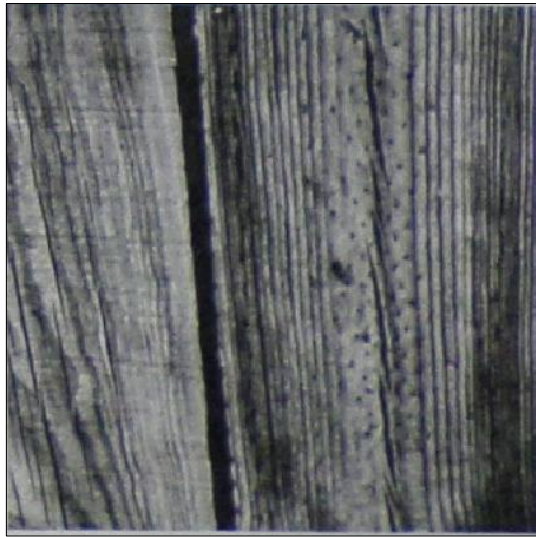


Figura 31 – Madeira com camada superficial alterada devido aos agentes erosivos.[DIAS, A. 2009];

2.13. PRESERVAÇÃO

A madeira como material natural tem um comportamento em questões de durabilidade diferente de materiais mais utilizados como o betão e o aço. A melhor maneira de proteger uma estrutura de madeira será a sua correcta aplicação. Isto é, a madeira deve estar sujeita a frequente ventilação e ter o mínimo contacto com zonas húmidas. A humidade é a principal condicionante em questões de durabilidade da madeira. Teores em humidade devem estar entre 13 e 17%. [NEGRÃO, J. 2009]. Valores superiores proporcionam o ataque biótico que em pouco tempo condicionam muito a estrutura de madeira. Sem humidade a acção de fungos xilófagos é inexistente. Apenas são conhecidos alguns outros ataques bióticos que não têm uma ligação directa com a humidade na madeira, mas são casos raros. São exemplos deste tipo de ataque insectos como térmitas da madeira seca. [DIAS, A. 2009]. Em zonas exteriores em que não é possível fugir à humidade são aplicados tratamentos preservativos tais como pinturas ou velaturas ou mesmo tratamentos com óxidos em autoclave. Produtos preservativos funcionam como protecção ao ataque por parte de organismos vivos. São químicos tóxicos para esses organismos, impedindo assim a sua acção. Os produtos preservativos da madeira são classificados em três grupos, oleosos, aquosos e em solvente orgânico. [NEGRÃO, J. 2009]. É ainda importante referir que quanto maior a facilidade de impregnação da madeira por estes produtos maior será a sua eficácia e durabilidade. Na figura seguinte é possível identificar que a linha da asna de madeira tem humidade excessiva, possivelmente devido a incorrecta instalação sem ventilação e contacto em todo o perímetro com a parede de alvenaria, ficando assim exposta à humidade da parede.



Figura 32 – Linha de asna com alto teor em água. [TIAGO, P.M. 2014];

2.14. PROTECÇÃO E RESISTÊNCIA AO FOGO

Do ponto de vista do comportamento ao fogo a madeira é vista como um material combustível, de modo que é por vezes considerado um material com mau comportamento ao fogo ou reduzida resistência. Tal não se revela verdade, pois que a madeira tem a particularidade de ser combustível, mas à medida que vai sendo consumida, na sua superfície tende-se a criar uma “membrana” de madeira carbonizada, que actua de certa maneira como um atenuador da velocidade com que é consumida. Resulta assim uma menor degradação da resistência da estrutura durante o incêndio, visto preservar durante mais tempo a secção resistente. Comparativamente às estruturas de aço a madeira ainda tem uma outra vantagem, com a temperatura a sua resistência não tem uma degradação extrema, ao contrário das estruturas em aço, o material pode não ser combustível, mas em contrapartida perde grande parte da sua resistência como o aumento de temperatura. A resistência do aço num incêndio pode baixar cerca de 60 a 80%, o que leva a grandes deformações e falhas estruturais.

Numa estrutura de madeira, à medida que o incêndio vai progredindo no tempo, são vários os processos que ocorrem no material. Num primeiro estágio, ocorre uma reacção endotérmica, visto a madeira absorver calor do incêndio para libertar a água que tem no seu interior. A partir do momento em que já não há humidade na madeira e a temperatura na sua superfície ronda os 300°C, em contacto com chamas, ou 400°C, sem contacto com chamas, dá-se a combustão do material. Passa a ser uma reacção exotérmica em que já se verifica a saída de gases do interior da madeira e se dá início ao processo de degradação estrutural.[NEGRÃO, J. 2009].



Figura 33 – Edifício em chamas, completamente destruído. [CORREIA, A.M. 2014];

3. ASNAS TRADICIONAIS DE COBERTURA

3.1. ORGANIZAÇÃO TRADICIONAL DE COBERTURA

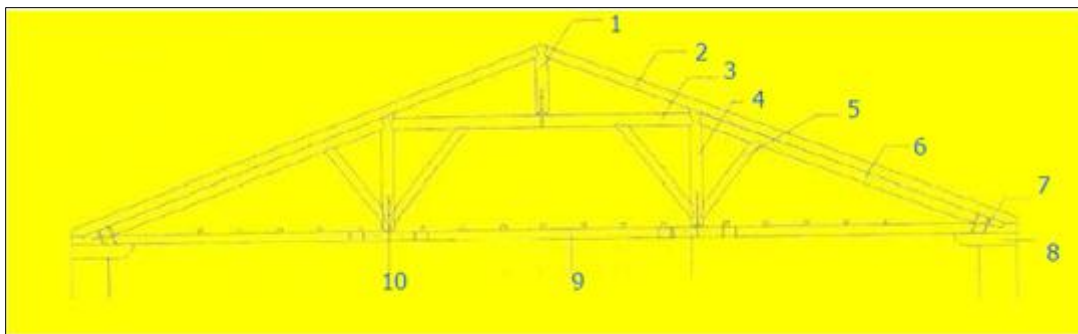


Figura 34 – Esquema asna de cobertura em madeira. [TIAGO, P.M. 2014];

Na figura apresentada encontram-se os principais elementos constituintes de uma asna de cobertura em madeira. Estão numerados os elementos de 1 a 10 que se podem encontrar na figura.

1: Pendural superior; 2:Perna; 3: Contra-linha; 4:Pendural; 5:Escora; 6: Reforço da perna; 7: Estribo metálico; 8: Cachorro de apoio; 9: Linha; 10:Ligador metálico.

Na figura seguinte é apresentada uma asna de cobertura simples em obra, na qual serão identificados os vários elementos e a sua função principal.



Figura 35 – Asna de cobertura simples em obra. [TIAGO, P.M. 2014];

Na figura 35 está representada uma asna tradicional ou asna simples aplicada em obra. São encontrados na figura os vários elementos constituintes da estrutura da asna. São eles:

Linha: a linha é a peça na direcção horizontal na asna, está apoiada em cada extremidade, neste caso em dois pilares de madeira, poderiam ser duas paredes. A linha funciona idealmente em tracção, transmitindo apenas carga vertical nos elementos em que está apoiada. Na linha descarregam os esforços provenientes das pernas, a ligação entre estes elementos é conseguida através de ensambladura simples embora na figura não seja facilmente identificável.

Pernas: as pernas são as peças inclinadas que descarregam a carga na linha. São peças que funcionam em compressão e nas quais estão assentes as cargas impostas pela cobertura.

Escoras: as escoras são as peças que fazem a ligação e transferência de carga entres as pernas e o pendural, são utilizadas para transferir a carga imposta pelas madres que se encontram aproximadamente a meio do comprimento das pernas, para o pendural, de maneira a não provocar flexão nas pernas. Funcionam em compressão e a sua ligação é efectuada por ensambladura simples.

Pendural: é o elemento vertical que transfere a carga imposta pelas madres superiores e escoras para as pernas através de esforço axial nestas. Funciona em tracção e pode ser ligado à linha através de ligação metálica rotulada, esta ligação previne a deformação a longo prazo da linha por flexão devido ao seu peso próprio.

3.2. ASNAS TRADICIONAIS SIMPLES

Como objecto do trabalho será estudada a asna tradicional ou simples. Trata-se de uma estrutura em madeira que pode cobrir vãos até 8m, composta por elementos em tracção e elementos em compressão. Os elementos utilizados são de secção que varia de acordo com as solicitações e os vãos a vencer. As ligações podem ser em contacto madeira madeira, topo a topo por ensabladura simples, ou mais complexas, por ligações em parafuso ou cavilha e reforçadas com chapas em aço. Esta estrutura apoia geralmente uma cobertura em telha cerâmica com pendentes que podem variar entre os 20 e os 30%. As telhas apoiam-se por cima de varas espaçadas entre 30 e 40cm que por sua vez assentam sobre a cumeeira, as madres e o frechal. Em alguns casos é ainda possível observar uma camada de pranchas em madeira que funcionam como guarda pó. O vão que a asna simples pode vencer varia entre os 5 e 8 metros. A estrutura é constituída por uma linha, elemento horizontal que está apoiada nas paredes com uma inserção de cerca de 20 a 25 cm, duas pernas inclinadas que formam a pendente da cobertura, um pendural apertado no vértice das pernas, elemento vertical em tracção e duas escoras que fazem a ligação entre pendural e pernas. Em alguns casos é ainda possível encontrar uma estrutura de apoio que faz a ligação entre as pernas, funcionando à compressão, chamando-se a esse elemento contralinha.[BRANCO, J. 2006].

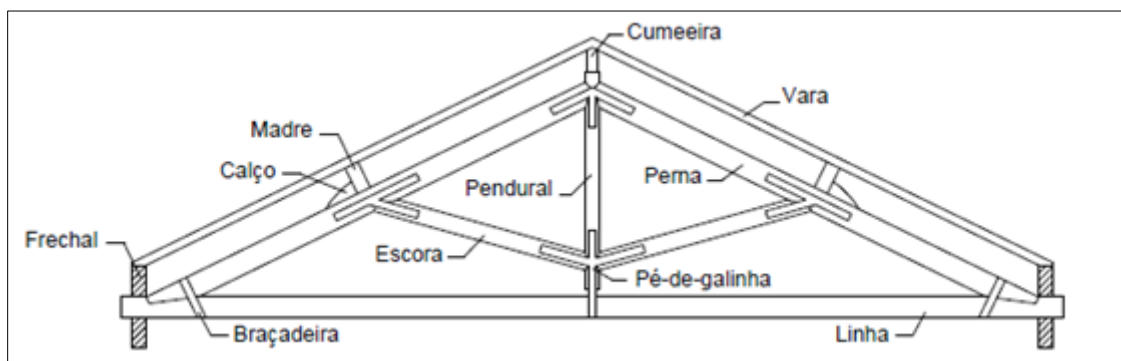


Figura 36 – Esquema estrutural de cobertura tradicional portuguesa com asna simples.
[BRANCO, J. 2006];

Na figura está representada uma asna simples com todos os seus elementos constituintes. São ainda representadas chapas de reforço em zonas de ligação. No caso de um calculo estrutural mais realista é importante não desprezar completamente a rigidez da ligação. As ligações em estruturas de madeira têm baixa rigidez, no entanto é importante considerar a pouca rigidez

nestas ligações para um cálculo mais preciso das deformações. Por mais baixa que seja não se trata de um rótula perfeita, embora por vezes seja considerada uma análise mais simplificada. Em acções assimétricas impostas na estrutura como vento neve e sismo, a rigidez nas ligações tem um papel importante na distribuição de esforços pela estrutura das asna. [BRANCO, J. 2006].

F. Costa propõe na Enciclopédia Prática da Construção Civil uma Quadro como pré dimensionamento de asnas simples em função do vão a vencer. Este tipo de asna tem sido construído ao longo das décadas, e em alturas em que o calculo estrutural estava pouco aprimorado, este tipo de guia dava uma grande ajuda na execução deste tipo de estruturas. Tendendo no entanto ao sobredimensionamento mas estabelecendo assim um padrão e uma relação entre inércias dos elementos mais equilibrada. A relação entre vãos e as secções dos elementos proposto por F. Costa pode ser observado na figura:

Vãos	Línbas	Pernas	Escoras	Pendurais	Madres	Varas
5.00	12 × 10	12 × 10	10 × 10	10 × 10	16 × 10	6 × 4
6.00	14 × 10	16 × 10	12 × 10	10 × 10	18 × 10	6 × 4
7.00	14 × 12	16 × 12	12 × 12	12 × 12	18 × 10	8 × 6
8.00	16 × 12	20 × 12	12 × 12	12 × 12	20 × 10	8 × 6

Figura 37 – Pré dimensionamento asnas simples, valores recomendados. [COSTA, F. 1955];

Na figura 37 os vãos vêm em metros e as secções dos elementos são expressas em cm.

Existem alguns pontos chave a respeitar na construção de uma asna simples. São pontos que devem ser respeitados de maneira a obter o melhor desempenho possível da solução sem anomalias estruturais decorrentes de incorrecta construção. alguns dos pontos a respeitar são os seguintes: As ligações devem respeitar a configuração original e ter os entalhes com profundidades adequadas de maneira a resistirem às solicitações impostas pela estrutura. A linha, embora tenha sempre de resistir a um determinado momento flector mínimo imposto pela excentricidade resultante do esforço excêntrico descarregado pelas pernas, deve resistir principalmente em tracção. As pernas devem resistir apenas a esforços de compressão, e o pendural não deve entrar em contacto com a linha, de maneira a que não sejam descarregados esforços na linha, tendo esta de resistir a um momento flector. No entanto, poderá haver uma ligação metálica entre linha e pendural, rotulada, de maneira a evitar a deformação da linha devido ao seu peso próprio. [BRANCO, J. 2006]

3.3. LIGAÇÕES TRADICIONAIS EM ANSAS

As ligações são o ponto mais importante da dissertação. É nas ligações que vai cair o estudo mais detalhado e aprofundado. As ligações nas asnas de madeira podem resumir-se a duas soluções. Podem estas ser em ligação por ensambladura ou por ligação metálica com recurso a cavilhas em aço. Como complemento a estes tipos de ligação são ainda utilizadas chapas de reforço e até mesmo conjugação de ligação em ensambladura com reforço por cavilha ou pregos.

O fluxo de forças nas zonas de juntas tem uma grande influência na capacidade de carregamento das ligações e estruturas em si. Devido ao frágil comportamento mecânico da madeira, a capacidade de suportar grandes cargas das ligações só pode ser alcançada quando grandes tensões localizadas forem evitadas. Distúrbios no fluxo de forças levam a tensões elevadas localizadas, que são frequentemente responsáveis por falhas estruturais. [LEONARDO DA VINCI, 2008].

3.3.1. LIGAÇÃO POR ENSAMBLADURA SIMPLES

A ligação por ensambladura está presente na esmagadora maioria das asnas de madeira em coberturas. É uma ligação muito eficiente, quando bem executada. O seu desenho é simples, embora exija uma cuidada execução. O encaixe entre peças deve ser perfeito. Com uma execução perfeita é assegurada uma correcta transmissão de esforços e bom funcionamento da ligação. Na figura é possível identificar a zona de ligação em ensambladura simples entre perna e linha fazendo um ângulo β .

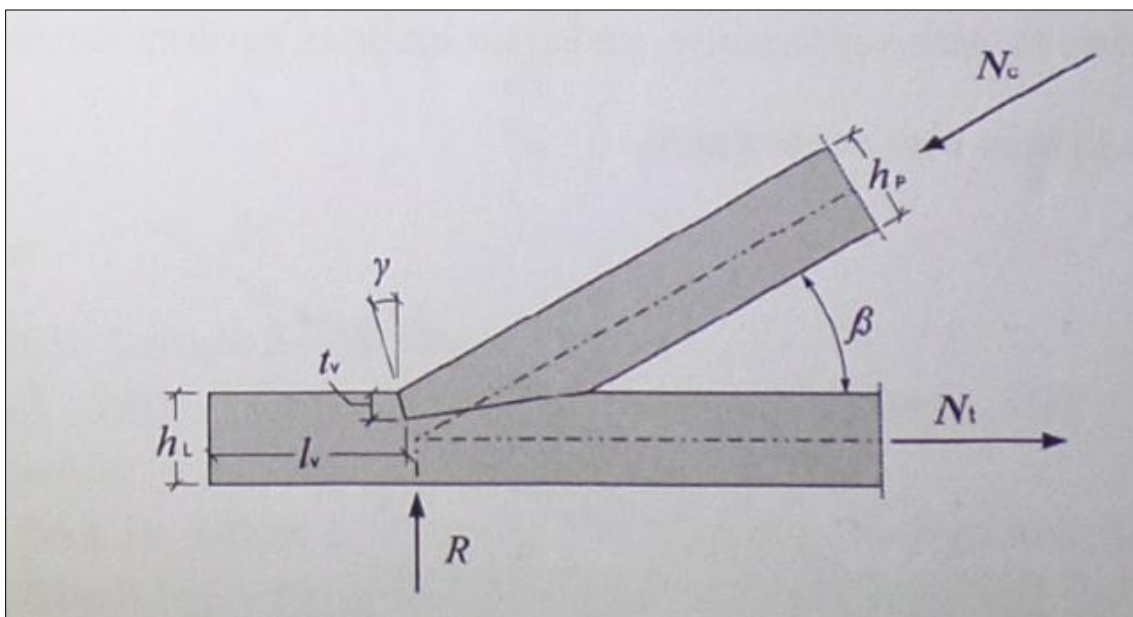


Figura 38 - Esquema ensambladura simples. [DIAS, A. 2009];

Numa ensabladura simples as resistências que estão a ser solicitadas na madeira pelas acções impostas são várias. São elas: Resistência em compressão perpendicular e paralela às fibras; Resistência ao corte e ainda uma verificação de segurança à tracção e esforço transverso na linha. Para além da ligação com ensabladura simples existem ainda outras variações. A ligação com ensabladura recuada, com ensabladura dupla, e a ligação com respiga. De todas a mais simples e mais utilizada é a ensabladura com dente simples ou ensabladura simples. Na figura seguinte pode ser visualizada em pormenor a ligação por meio de ensabladura ilustrada por Costa, F.

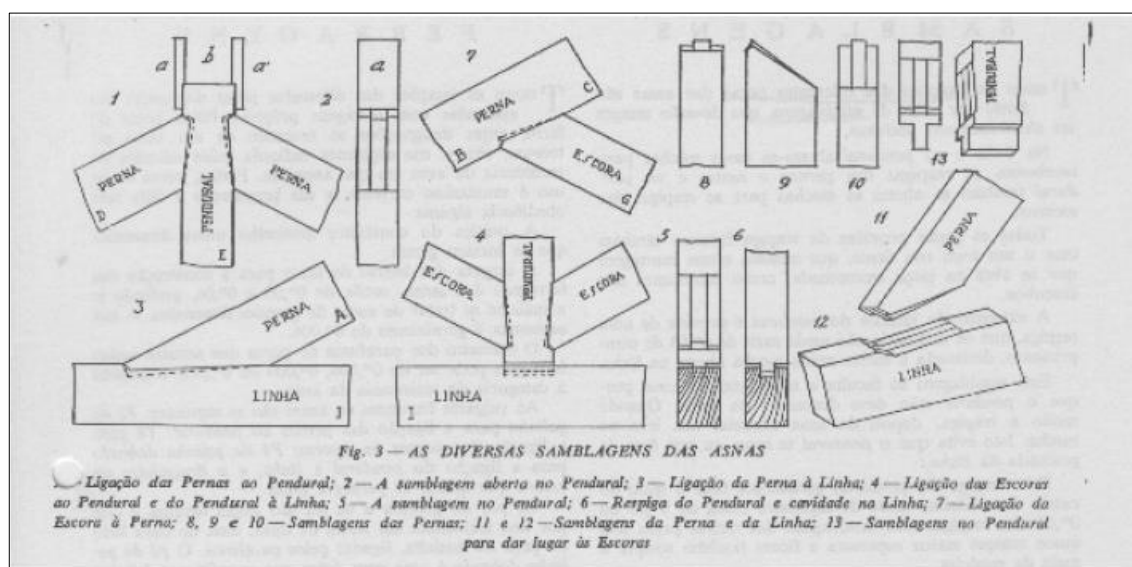


Figura 39 – Ligações por ensabladura. [COSTA, F. 1955];

Em ligações tradicionais de madeira, as ligações por ensabladura, a transferência de cargas é feita em geral pelo contacto madeira-madeira carregadas em compressão, grande parte das soluções com esforços de corte combinados com os esforços de compressão. Em ligações madeira-madeira a capacidade resistente é geralmente baixa e pode ser aumentada através do uso de buchas de aço ou gussets. [LEONARDO DA VINCI, 2008].

Dependendo da configuração das cargas, diferentes distribuições de esforço transversal ocorrem, em compressão ou em tracção em zonas carregadas. Enquanto ligações carregadas em compressão têm uma distribuição de esforço transversal uniformemente distribuída, as zonas carregadas em tracção mostram um máximo localizado, sendo a distribuição considerada localizada e mal distribuída. Como o desenho das ligações tem de cobrir os valores máximos calculados para um correcto dimensionamento este tipo de situação leva a uma baixa eficácia da solução.

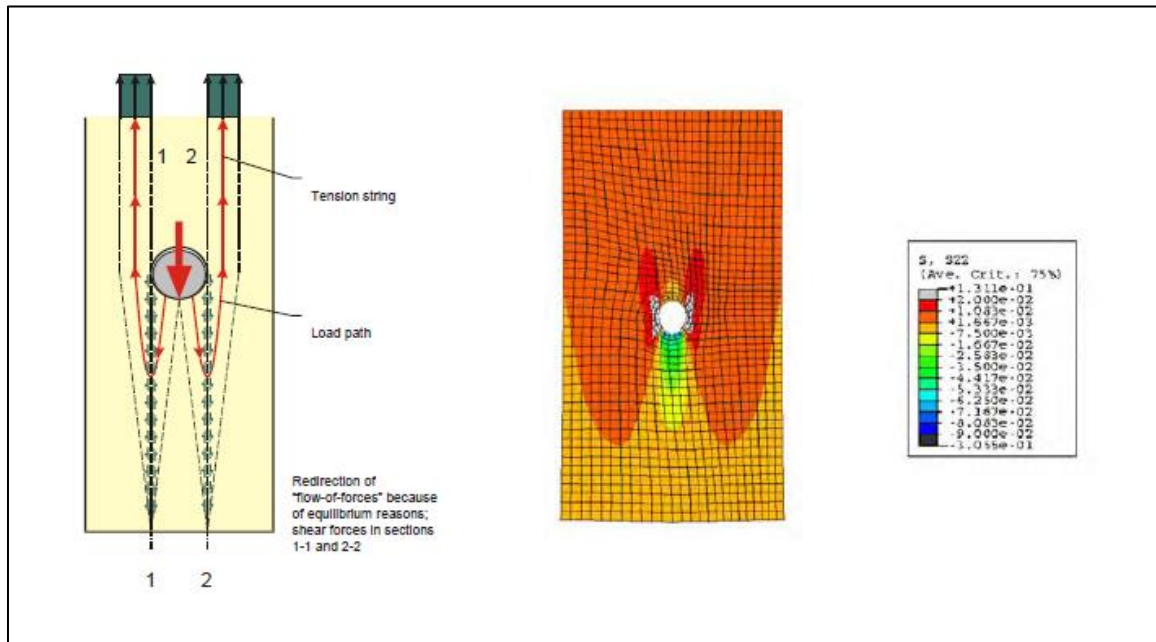


Figura 40 – Cavilha em peça de madeira em tracção [LEONARDO DA VINCI, 2008];

Na figura, esforços perpendiculares às fibras, que são necessários para o equilíbrio mecânico não são mostrados. Terão de ser consideradas no desenho das peças, partindo assim do princípio de que na própria concepção das estruturas se obedece a regras específicas de medidas de peças e afastamentos de ligações ou ligadores de maneira a responder a essa solicitação.

Deve ser mencionado que no geral, para ligações carregadas com esforços de tracção e corte, um grande decréscimo da capacidade de carregamento deve ser considerado, enquanto para ligações carregadas com combinação de esforços de compressão e corte, um pequeno aumento da capacidade resistente pode ser alcançada. Isto é um facto conhecido na prática e é usado por exemplo no desenho de ligações em ensambladura.

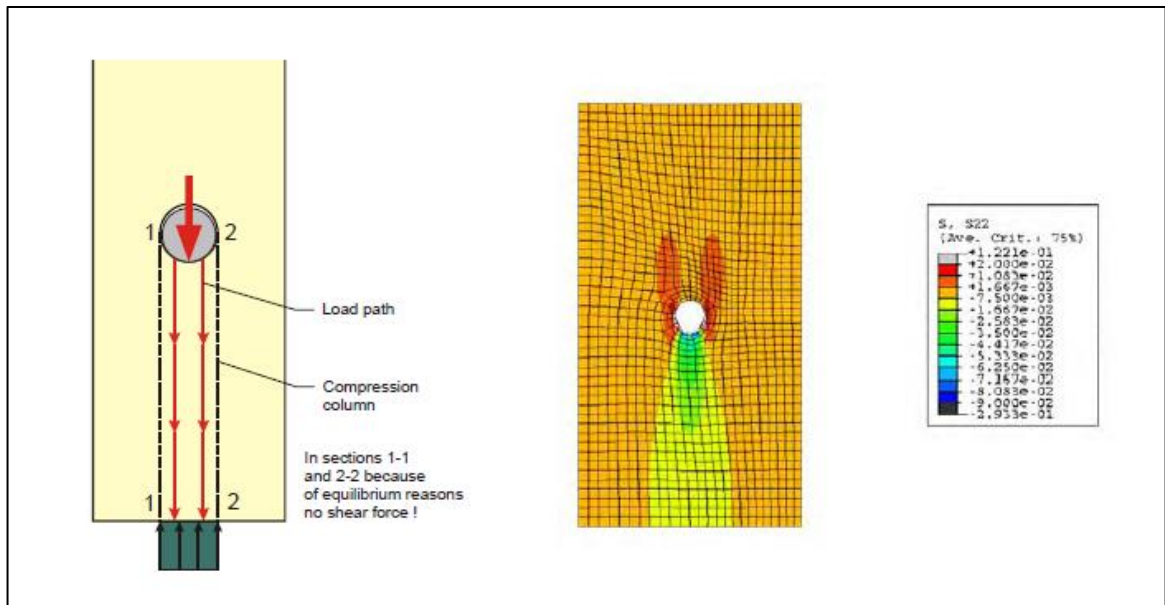


Figura 41 – Cavilha em peça de madeira em compressão [LEONARDO DA VINCI, 2008];

3.3.2. LIGAÇÃO POR PARAFUSO OU CAVILHA

Os ligadores correntes em Portugal são vários, desde cavilhas, pregos, parafusos de porca, agrafos, parafusos de enroscar e chapas metálicas denteadas. A ligação por parafuso era a alternativa à ligação por ensambladura. O parafuso era em aço, embora um aço macio. Consistia na ligação entre duas ou três peças de madeira por um parafuso que resistia em corte ao esforço imposto. Como a madeira tem uma dureza muito inferior ao material do parafuso esta tendia a deformar-se por esmagamento no contacto com maior tensão no parafuso. Esse esmagamento imposto leva a uma maior deformação na ligação, pelo que o parafuso deixa de resistir em corte, apenas, e passa a resistir a uma combinação de esforços. Esforços como tracção, corte e flexão. Para além destes mecanismos de resistência o parafuso quando apertadas com adequada tensão, ou seja, antes do esmagamento da madeira, contribuem também para o aperto ou tensão entre as faces dos elementos de madeira o que leva a uma resistência adicional ao deslizamento por atrito na ligação. Esta contribuição pode ser contabilizada pelo cálculo da força que o aperto da cavilha com porca faz entre as peças de madeira. A força de atrito será o produto entre essa força de compressão e um coeficiente de atrito entre as peças de madeira. O valor para o coeficiente de atrito estático entre duas peças de madeira seca pode variar entre 0.25 e 0.5 segundo Quadros técnicas. Na figura seguinte podem ser retirados valores de coeficiente de atrito estático entre vários materiais,

nos quais se encontram os valores de 0.45 para contacto entre madeira-madeira paralelo às fibras e 0.35 perpendicular às fibras. [CACHIM, P, 2007].

As ligações em estruturas de madeira com excepção das ensambladuras constituem os pontos mais perigosos pois a falha de uma única conexão poderá levar ao colapso de toda a estrutura. [MOLITERNO, A. 1981].

As ligações nas peças de madeira sofrem todas elas deformações. É muito difícil estimar tais deformações teoricamente e para além desta situação ainda contribuem para a menor eficácia das ligações outros aspectos, tais como:

- Tipo de ligação, a figura mostra o comportamento dos vários tipos de ligação, fazendo uma correlação entre a força aplicada em toneladas e a deformação observada em milímetros.

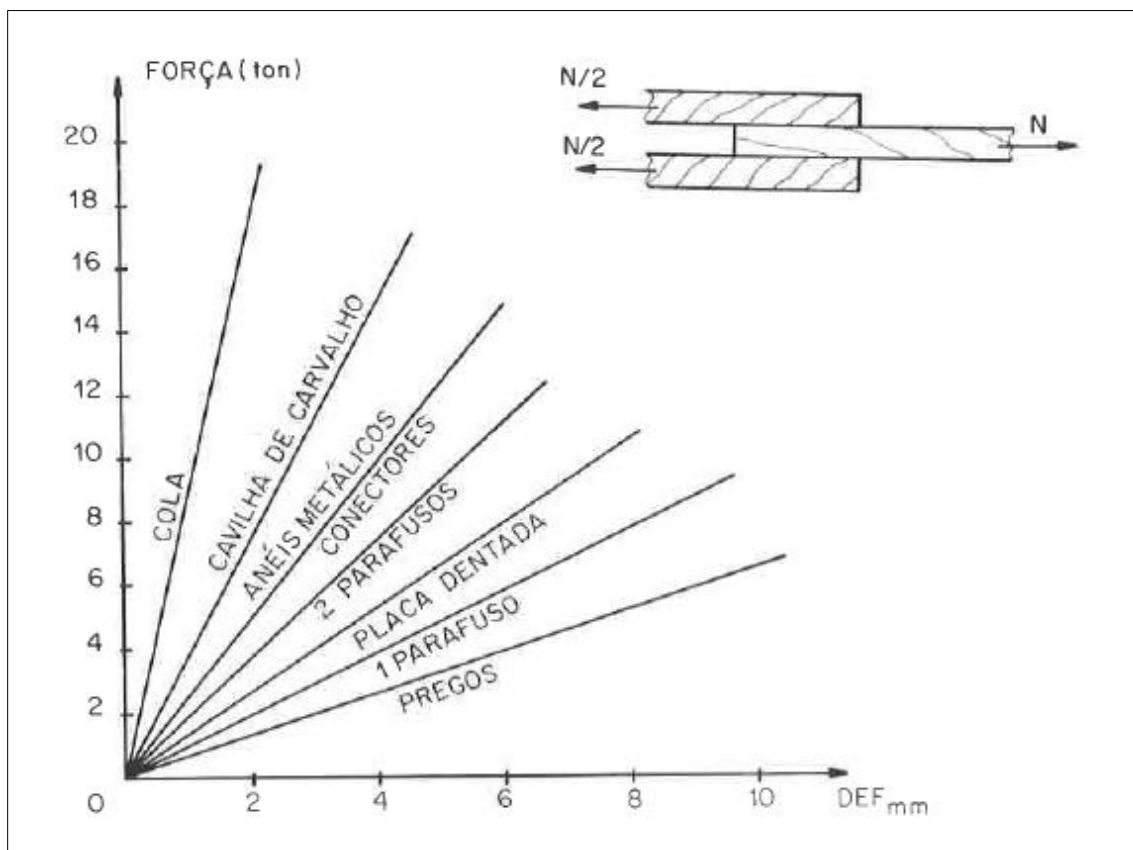


Figura 42 – Valores de deformação/força para várias ligações. [MOLITERNO, A. 1981];

- Comportamento elástico plástico da madeira nos pontos de encontro das ligações ou pontos de contacto entre elementos ligados;
- Qualidade do projecto e da mão de obra, é um factor preponderante. As ligações podem baixar muito a sua eficiência quando mal executadas ou mal planeadas.

Em comparação com ligações tradicionais, um aumento significativo da capacidade resistente pode ser alcançado quando fixadores são carregados transversalmente ao seu eixo, como

pinos, parafusos, cavilhas ou pregos. Isto em particular quando os fixadores são combinados com placas de aço. Quando se verifica a transferência de cargas, estas ligações fazem a transferência de cargas por contacto em compressão e corte. Ao contrário das ligações tradicionais, estes tipos de ligação têm uma importante vantagem, devido à utilização de ligadores deformáveis, ligações com comportamento dúctil podem ser produzidas. O que leva a um aumento da capacidade resistente. Para que estas ligações funcionem desta maneira devem ser respeitados espaçamentos e distancias entre ligadores na concepção das peças.

Na imagem seguinte é mostrada detalhadamente a transferência de carga com um ligador metálico do tipo cavilha. Na zona de contacto entre o ligador e a peça de madeira emergem esforços radiais, os quais podem ser separados em esforços perpendiculares e paralelos às fibras. Enquanto as peças de madeira apresentam uma relativamente alta resistência aos esforços paralelos às fibras e uma baixa resistência para os esforços perpendiculares às fibras. Os esforços paralelos às fibras estão a carregar as peças de madeira em esforços de tracção perpendiculares às fibras fazendo com que as peças fendilhem, falhando assim por fendimento. Neste caso deve ser referido que a madeira devido ao seu comportamento anisotrópico tem uma reduzida resistência a esforços de tracção perpendiculares às fibras.

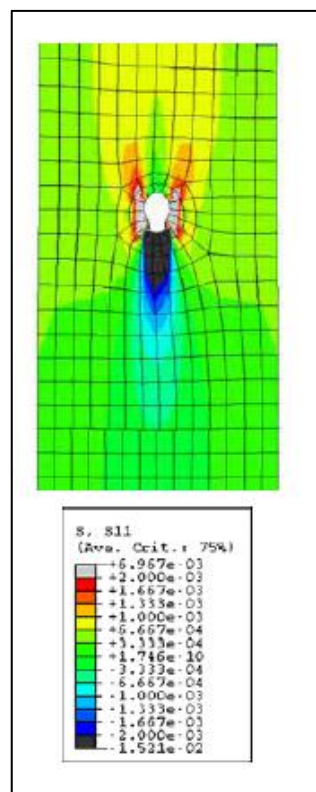


Figura 43 – Transferência de carga entre ligador e peça de madeira. [LEONARDO DA VINCI, 2008];

Esta característica é válida em particular para ligadores pouco esbeltos, ou seja, ligadores como por exemplo cavilhas ou parafusos que devido à sua relação entre comprimento e espessura apresentam um comportamento muito rígido para deformações por momento flector, também por falta de espaçamento entre ligador e peça. Neste caso o eixo do ligador

mantem-se com menor deformação e a madeira fendilha. Este comportamento é descrito como frágil.

Se pelo contrário o ligador apresentar uma alta esbelteza é deformado em flexão e então a resistência da ligação é determinada pela resistência ao momento flector do ligador. Isto leva assim a um menor risco de fendilhar a peça de madeira e conseqüentemente a uma maior resistência mecânica da ligação e também a uma maior ductilidade da ligação e do ligador.

Como consequência do citado anteriormente faz mais sentido utilizar em vez de um ligador com maior diâmetro, vários ligadores de menor diâmetro.

Naturalmente a resistência ao momento flector do ligador em si desempenha um papel importante na determinação da capacidade resistente da ligação.

Em caso de esforços perpendiculares às fibras o fendilhar das peças pode ser explicado de uma maneira semelhante, mas ao contrário das cargas paralelas às fibras a tendência ao fendimento é muito menor. Em adição a capacidade resistente devido à anisotropia perpendicular às fibras é menor também.

Para esforços de compressão, a área carregada é aproximadamente equivalente ao diâmetro do ligador. A haste de compressão mostrada nas figuras é suficiente para assegurar o equilíbrio de forças.

Para esforços de tracção, a zona debaixo do ligador é carregada em geral com esforços de corte mal distribuídos. Quando a carga é transmitida para a peça devido a razões de equilíbrio nas zonas de periferia dos membros, um grande esforço de tracção é provocado. A largura necessária da peça é determinada pela resistência à tracção da peça. Devido à redirecção das forças são provocados esforços de corte também. Em adição também esforços de tracção perpendiculares às fibras começam a aparecer debaixo do ligador. A combinação de esforços de tracção e corte leva a uma falha por fendimento prematura. Nesta situação terão de ser alongados os topos das peças por forma a aumentar a área resistente ao fendimento.[Leonardo da Vinci].



Figura 44 – Ligação por parafuso. [TIAGO, P.M. 2014];

3.3.3. LIGAÇÃO POR CAVILHA DE MADEIRA

Na década de 1930, no Brasil, grandes estruturas foram realizadas com ligações feitas através de pinos circulares em ipê. Foram assim substituídos os pinos de aço por pinos de madeira dura. Baseando-se no pressuposto de que a resistência da ligação é conseguida através da pressão de contacto. A pressão entre o pino e a madeira da peça, embora não seja posta de lado a influência da flexão do pino. Por ser um calculo complexo o dimensionamento deste tipo de ligação baseia-se em ensaios laboratoriais.

É um tipo de ligação muito cuidada, pelo que a mão de obra tenha de ser qualificada para a sua aplicação. Este tipo de ligação revela-se especialmente útil em zonas nas quais o ataque químico é muito forte e ligações com utilização de cavilha ou parafuso em aço tenderiam a corroer muito rapidamente. É ainda importante que na aplicação deste tipo de ligação o pino de madeira dura tenha um diâmetro igual ou superior ao orifício no qual será colocado, isto para garantir que não haja folga na ligação e esta seja firme [MOLITERNO, A, 1981].

3.4. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA ASNA SIMPLES

Em [BRANCO, J. *et al* WCTE 2006] é feito o estudo do comportamento estrutural da asna simples sob o efeito de acções simétricas e assimétricas. São analisados parâmetros como a importância da ligação pendural-linha, a rigidez das ligações e a colocação das madres com ou sem excentricidade relativamente aos nós.

Do estudo salientam-se algumas conclusões principais, são elas:

- As pernas são os elementos mais carregados da estrutura, apresentam tensões normais e tensões de corte. O pendural está submetido à tracção, as escoras à compressão e a linha à tracção, mas com o seu peso próprio apresenta também alguma flexão.
- A influencia das ligações é condicionante apenas para acções assimétricas como a neve, vento ou sismo. Quando cargas pontuais aplicadas sobre os nós da asna sem flexão, a redistribuição de esforços tem como principal condicionante a geometria da asna.
- A excentricidade as madres relativamente aos nós altera a distribuição de esforços na asna, condicionando principalmente a pernas. Uma excentricidade de apenas 20cm que é muito comum de considerar nestes casos é suficiente para condicionar a segurança estrutural das pernas.
- De forma a reduzir a sua deformação devido ao peso próprio a linha deve ser suspensa no pendural. A ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da asna.
- A frequência natural e os modos de vibração da estrutura são alterados quando a ligação pendural-linha apresenta rigidez.
- A ligação mais condicionante na asna simples é a ligação perna-linha. São os pontos de maior concentração de esforços e onde a deterioração biológica é mais frequente.

Na figura seguinte que foi retirada de um estudo de comportamento estrutural de asnas simples pode-se observar os diagramas de esforços resultantes das cargas impostas numa asna simples. No diagrama da esquerda está representada uma asna simples em que foi implementada uma ligação entre o pendural e a linha e no diagrama da direita uma asna simples na qual não há qualquer ligação entre pendural e linha. Os resultados são significativos.

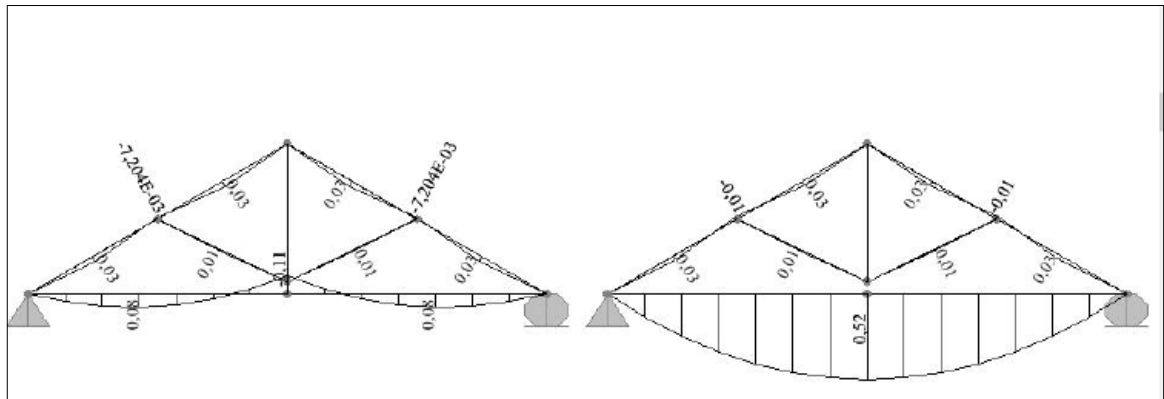


Figura 45 – Diagrama de momentos flectores em asna simples. [BRANCO, J. *et al* WCTE 2006];

3.5. REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE COBERTURA EM MADEIRA

Estruturas de cobertura antigas são abordadas geralmente quando necessária uma intervenção de reabilitação com o objectivo de melhorar as condições existentes e reparar defeitos ou anomalias que foram evoluindo ao longo do tempo.

O critério mais importante a respeitar é a verificação de segurança estrutural de pessoas e bens(estados limites últimos e de utilização). O segundo critérios a respeitar também é a renovação e melhoramento da funcionalidade da estrutura considerando critérios não exclusivamente estruturais.[AMORIM FARIA, J. 2002].



Figura 46 – Reabilitação de cobertura em asnas de madeira. [TIAGO, P.M. 2014];

Amorim Faria refere ainda alguns aspectos importantes a seguir na medida do possível, são eles:

- Manter a estrutura num nível baixo de esforço mecânico;
- Eliminar causas de degradação antes de proceder a acções específicas de restauro;
- Preservar a autenticidade do monumento;
- Reduzir a um nível mínimo o sacrifício dos materiais originais;
- Quando necessário deixar no local os elementos originais que já não têm condições de assegurar a segurança e introduzir novos elementos capazes de resistir aos esforços;
- Controlar a fluência e o desempenho em serviço como deformações e vibrações ao mesmo nível da resistência mecânica;
- Adoptar soluções técnicas reversíveis sempre que possível;
- Manter se possível o mesmo diagrama de esforços original, para isso imitar o quanto possível as restrições a movimentos de apoios da estrutura original;
- Permitir a identificação da intervenção.

3.6. SOLUÇÕES DE REFORÇO EM LIGAÇÕES DO TIPO ENSAMBLADURA

As ligações têm sido reforçadas desde que se conhece a sua construção, embora as ligações metálicas tenham sido mais vulgarizadas no século XIX com o início da revolução industrial. Antigamente a utilização destes elementos nos vários pontos de ligação e tipos de ligação de uma asna servia unicamente para prevenir a deslocação dos elementos ligados para fora do plano de ligação. Nos dias de hoje para além dessa situação também é considerado o comportamento da ligação no seu próprio plano e de assegurar o contacto entre peças ligadas.

Algumas situações de reforço:

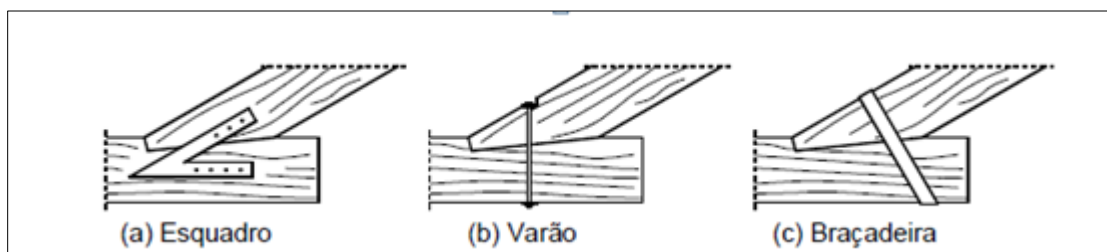


Figura 47 - Reforço de ligações. [BRANCO, J. 2006];

A utilização de esquadros metálicos é uma típica solução de reforço utilizado em Portugal em ligações do tipo ensabladura, o reforço é constituído por dois esquadros, um de cada lado da

ligação, ligados por parafusos de porca. Os esquadros são formados por duas chapas metálicas soldadas em forma de V.

A solução de reforço com varão constitui uma solução de reforço mais actual, a solução consiste num varão introduzido no meio da ligação como se pode ver na figura x, (b), apertado nas extremidades com porcas, tem como principal função a absorção de momentos na ligação.

A solução de reforço com braçadeiras foi no século XIX muito utilizada, embora actualmente seja considerado obsoleto.

Relativamente ao contributo deste tipo de reforços de ligações concluíram que todos os reforços denotam eficiência. Capacidade de resistência de ligação é aumentada, a rigidez é superior. Contudo o maior contributo dos reforços nas ligações é dar ductilidade às ligações. [BRANCO, J. 2006].

3.7. SOLUÇÃO DE REFORÇO EM LIGAÇÃO DO TIPO CAVILHA

Assim como a ligação por ensambladura, a ligação por parafuso ou cavilha pode ser também reforçada. Podem ser utilizados no reforço casquilhos metálicos ou painéis estruturais de reforço.

3.7.1. CASQUILHOS METÁLICOS

A utilização de reforço baseada na aplicação de insertos metálicos colados nos furos das peças de madeira tem já sido empregue com sucesso. Ensaio por esmagamento localizado deste tipo de reforço em madeira de pinho bravo verificam ganhos superiores a 50% na resistência ao esmagamento na direcção longitudinal e superior a 80% na direcção radial. [SANTOS, C. UTAD]. Porém este tipo de reforço não aumenta significativamente a ductilidade da ligação, nos ensaios realizados em que é sujeita a um esforço uma ligação por parafuso com três peças de madeira, uma central e duas laterais, quando a rotura se dá na peça central o comportamento é dúctil, mas quando a rotura se dá pelas peças laterais é frágil. Neste ensaio foi possível concluir que com este tipo de reforço aumentam as cargas de rotura.



Figura 48 – Reforço com casquilho metálico, secção transversal. [SANTOS, C. UTAD];

3.7.2. PÁINEIS ESTRUTURAIS DE REFORÇO

O reforço através da utilização de laminados de carbono de duas direcções com resina epóxi constitui um reforço muito eficiente na eliminação de modos de rotura frágeis e aumento de resistência ao esmagamento da madeira. Este tipo de reforço confere um aumento muito significativo da ductilidade da ligação.



Figura 49 – reforço de ligação com utilização de laminados de carbono. [SANTOS, C. UTAD];

3.7.3. OUTROS TIPOS DE REFORÇO

São conhecidos ainda outros tipos de reforço para este tipo de situações. A aplicação de materiais mais resistentes nas superfícies laterais das peças de madeira, na envolvente dos

furos, alguns produtos utilizados no reforço são: Madeiras de alta densidade, produtos derivados da madeira, chapas metálicas e materiais compósitos reforçados com fibras. os reforços neste tipo de ligações são aplicados através de colagem ou até mesmo pregagem.

O objectivo do reforço de ligações do tipo parafuso ou cavilha passa por controlar a rotura paralela e perpendicular ao fio da madeira e aumentar também a resistência ao esmagamento. [SANTOS, C. UTAD]. Técnicas de reforço com a injeção de resinas entre o parafuso e a madeira são também utilizadas, levando ao aumento da rigidez das ligações.

3.8. SOLUÇÃO PROPOSTA DE REFORÇO DE LIGAÇÃO DO TIPO PARAFUSO

A solução de reforço para uma ligação do tipo parafuso passa pela colocação de um casquilho em madeira de alta densidade ao redor do parafuso e estabelecendo esta assim a transmissão de esforço entre o parafuso e a peça de madeira. Para a aplicação do casquilho em madeira, à semelhança do que fizeram em A. *Desenvolvimento de Soluções de Reforço em Ligações de Madeira do Tipo Cavilha* com o reforço em casquilhos metálicos. Na peça de madeira a reforçar é alargada a zona de inserção do parafuso e colocado um casquilho em madeira de alta densidade com diâmetro interior ajustado ao parafuso e diâmetro exterior ajustado à peça de madeira.

3.9. DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÃO COM PARAFUSO

3.9.1. DIMENSIONAMENTO DE ACORDO COM EUROCODIGO 5

O dimensionamento da ligação com parafuso será efectuado de acordo com o que é preconizado no EC5-1-1. Desta maneira serão seguidas as metodologias de cálculo para os vários módulos de rotura da ligação. A ligação a dimensionar será do tipo corte duplo em que um parafuso em aço faz a ligação entre três elementos de madeira, dois dos elementos com tracção na mesma direcção e um outro elemento central com tracção oposta aos outros dois. As regras de dimensionamento preconizadas no EC5-1-1 baseiam-se na teoria de Joahnsen. O método estabelece as equações de equilíbrio limite para vários tipos de ligações, ligações madeira-madeira, madeira-derivados de madeira e madeira-aço. Baseiam-se no comportamento rígido-plástico do aço com o qual são constituídos os ligadores, e o comportamento da madeira sujeita ao esmagamento por estes elementos. No cálculo é assim considerada a resistência ao esmagamento localizado da madeira e o momento plástico do ligador. [NEGRÃO, J. 2009].

A ligação em corte duplo apresenta uma configuração em regra, simétrica. O plano de simetria é coincidente com o plano médio do elemento central. Para a ligação em corte duplo madeira-madeira são três os módulos de rotura. São eles:

Modos de rotura de tipo 1A:

Os dois modos seguintes correspondem ao esmagamento localizado das duas barras de madeira, o modo de rotura a) para o esmagamento das duas barras laterais e o modo de rotura b) para o esmagamento da barra central.

a) $F_{v,RK,1A1} = f_{h,1,k,t} d$ (2)

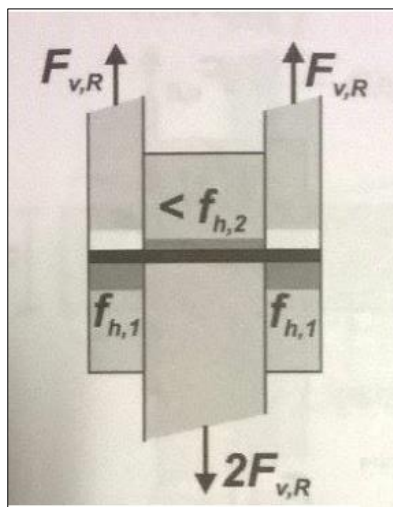


Figura 50 – Modo de rotura a).[CACHIM, P. 2007];

$$b) F_{v,RK,1A2} = 0.5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (3)$$

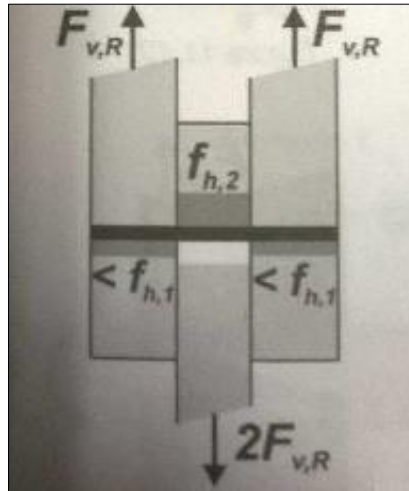


Figura 51 – Modo de rotura b). [CACHIM, P. 2007];

Em que:

$F_{v,RK,1A1}$: Valor característico da força resistente do modo de rotura a);

$F_{v,RK,1A2}$: Valor característico da força resistente do modo de rotura b);

$f_{h,1,k}$: Resistência característica ao esmagamento localizado;

t_1 : Soma das espessuras dos elementos laterais;

d : Diâmetro do ligador;

t_2 : Espessura do elemento central

$f_{h,2,k}$: Resistência característica ao esmagamento localizado.

Para o cálculo da resistência ao esmagamento localizado é utilizada a seguinte metodologia de cálculo:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{K_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (4)$$

Em que α é o ângulo que a força faz com o fio.

$$\text{Com } f_{h,0,k} = 0.082 * (1 - 0.01 * d) * p_k \quad (5)$$

Em que $f_{h,0,k}$ e $f_{h,\alpha,k}$ são as resistências ao esmagamento localizado em N/mm^2 , na direcção do fio e a um angulo α , d é o diâmetro do ligador em mm e p_k é a massa volúmica da madeira em Kg/m^3 .

Valores para K_{90} : (6)

$K_{90} = 1.35 + 0.015 * d$ para resinosas;

$K_{90} = 1.30 + 0.015 * d$ para LVL;

$K_{90} = 0.90 + 0.015 * d$ para folhosas.

Modo de rotura tipo 2:

Neste caso é considerada a formação de duas rótulas plásticas em posições simétricas em relação ao plano médio. Estas podem convergir numa única rótula plástica central. A resistência característica para este tipo de rotura é dado pela seguinte expressão:

$$F_{v,RK,2} = 1.05 * \frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{2 + \beta} \left(\sqrt{2 * \beta * (1 + \beta) + \frac{4 * \beta * (2 + \beta) * M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * t_1^2 * d}} - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (7)$$

Em que:

$$F_{ax,Rk} = 3 * f_{c,90,k} * \pi * (\Phi_{anilha}^2 - (\Phi_{parafuso} + 2)^2) / 4 \quad (8)$$

Em que os diâmetros vêm em mm e o valor de resistencia à compressão perpendicular às fibras em MPa.

O valor de $F_{ax,Rk}/4$ tem o valor máximo do modo de rotura tipo 2 e 3, não podendo ultrapassar esses valores.

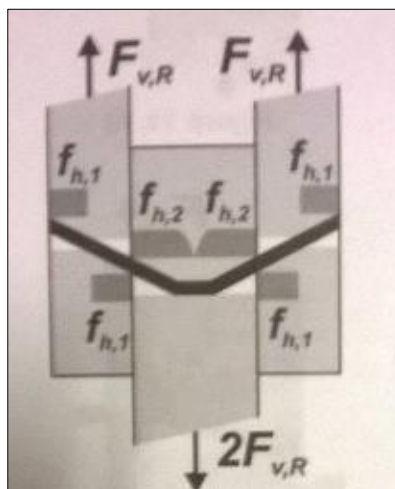


Figura 52 – Modo de rotura 2.[CACHIM, P. 2007];

$$\text{Com: } M_{y,R,k} = 0.3 * f_{u,k} * d^{2.6} \quad (9)$$

Em que:

$M_{y,R,k}$: Valor característico do momento plástico do ligador;

β : Rácio $f_{h,1,k}/f_{h,2,k}$. Igual a 1 para materiais iguais.

Modo de rotura de tipo 3:

Este modo de rotura ocorre pela formação de quatro rótulas plásticas, simétricas duas a duas em relação ao plano médio. As duas rótulas interiores podem ainda concorrer numa única rótula central.

O valor característico de resistência para este modo de rotura é dado pela seguinte expressão:

$$F_{v,Rk,3} = 1.15 * \sqrt{\frac{4 * \beta}{1 + \beta} M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (10)$$

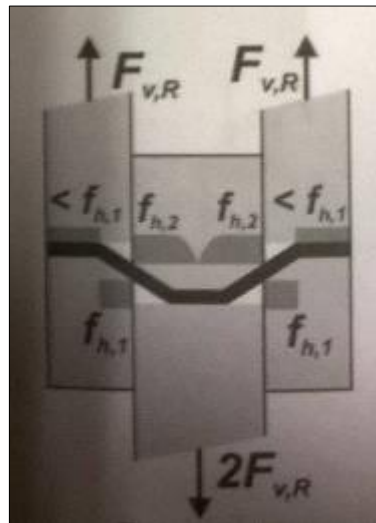


Figura 53 – Modo de rotura tipo 3.[CACHIM, P. 2007];

Conhecidos os vários modos de rotura para a ligação com parafuso em corte duplo madeira-madeira pode ser dimensionada uma ligação. Para isso foi montada uma folha de cálculo com as equações anteriormente apresentadas e as variáveis utilizadas. Importa referir ainda os valores característicos para as resistências da madeira com a qual se vai trabalhar bem como a densidade. Será apresentada uma Quadro com esses valores.

3.9.2. ORGANIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO EM FOLHA DE CÁLCULO

Quadro 1 – Folha de calculo Excel ligação dupla madeira – madeira;

Dimensionamento ligações madeira-madeira por parafuso (ligação dupla)										
Dados e dimensões				un						
t1		44	mm							
t2		72	mm							
d		12	mm							
$f_{h,0,k}$	23,0912	$f_{h,1,k}$	23,09	MPa						
d	12	$f_{h,2,k}$	23,09	MPa			Kmod	0,6		
p_k	320						γ_m	1,3		
$M_{y,R,k}$	69070,88	β	1	ad			$f_{c,90,k}$	2,2	N/mm ²	
$f_{u,k}$	360						$F_{ax,Rk}$	3649,274	N	
							Φ_{anilha}	30	mm	
							$\Phi_{parafuso}$	12	mm	
							$F_{ax,Rk}/4$	912,3185	N	
$f_{h,\alpha,k}$	23,0912									
	valores para K_{90}	1,53	resionosas							
		0,234	LVL							
		0,162	folhosa							
$\alpha 1$		0	RAD	$\alpha 2$		0	RAD			
Modo rotura tipo 1A				0 ^e		0 ^e				
	$F_{v,Rk,1A1}$	12192,1536	N							
	$F_{v,Rk,1A2}$	9975,3984	N							
Modo rotura tipo 2										
							Valor max			
$F_{v,Rk,2}$	5781,247395	N				$F_{v,Rk,2}/4$	1445,3118	N		
	$F_{v,Rk,2}$	6693,565901	N							
Modo rotura tipo 3										
							valor max			
$F_{v,Rk,3}$	7114,988627	N				$F_{v,Rk,3}/4$	1778,7472	N		
	$F_{v,Rk,3}$	8027,307134	N							
	Resistencia final caracteristica	6693,565901	N	Resistencia de calculo		6,18	KN			
		13,387	KN							

A folha de cálculo foi organizada seguindo o dimensionamento pelo eurocodigo 5, na folha entram as várias variáveis da ligação, consoante o tipo de ligação e o tipo de madeira utilizado. O valor de resistência final é multiplicado por dois, visto serem dois planos de corte. São ainda aplicados os factores redutores Kmod e γ_m ao valor de resistência final.

3.10. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÃO POR PARAFUSO A UMA ASNA EXISTENTE

Como demonstração de dimensionamento a uma asna existente que será mostrada na figura seguinte procedeu-se inicialmente á atribuição de dimensões dos elementos constituintes da estrutura, de notar que no caso se trata de uma asna simples com contra-linha. De seguida foi calculada uma carga linear tendo em consideração os estados limites últimos com o valor de 5.2KN por m linear.



Figura 54 – Asna simples com contra - linha. [TIAGO, P.M. 2014];

A madeira considerada no dimensionamento é um resinosa de classe C18, com um $f_{c,90,k}=2.2\text{MPa}$, e um $p_k=320\text{kg/m}^3$. O parafuso considerado tem um $f_{u,k}=360\text{MPa}$ e um diâmetro de 12 mm com anilhas de 30mm. Na figura seguinte pode ser observado o esquema estrutural montado no programa de calculo a duas dimensões FTOOL.

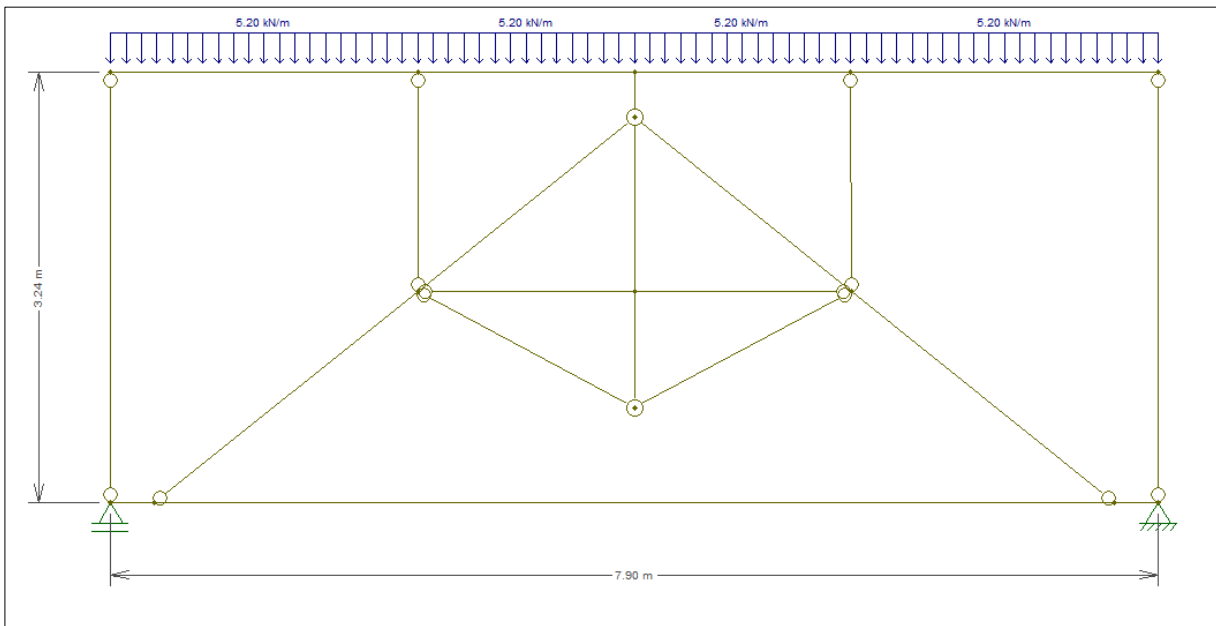


Figura 55 – Esquema estrutural FTOOL;

Na figura 47 pode ser observado o diagrama de esforço axial resultante do carregamento na figura 46. De notar que apenas interessa mostrar os valores de esforço axial para o nó onde se encontram a escora e a contra – linha, que será a ligação a estudar.

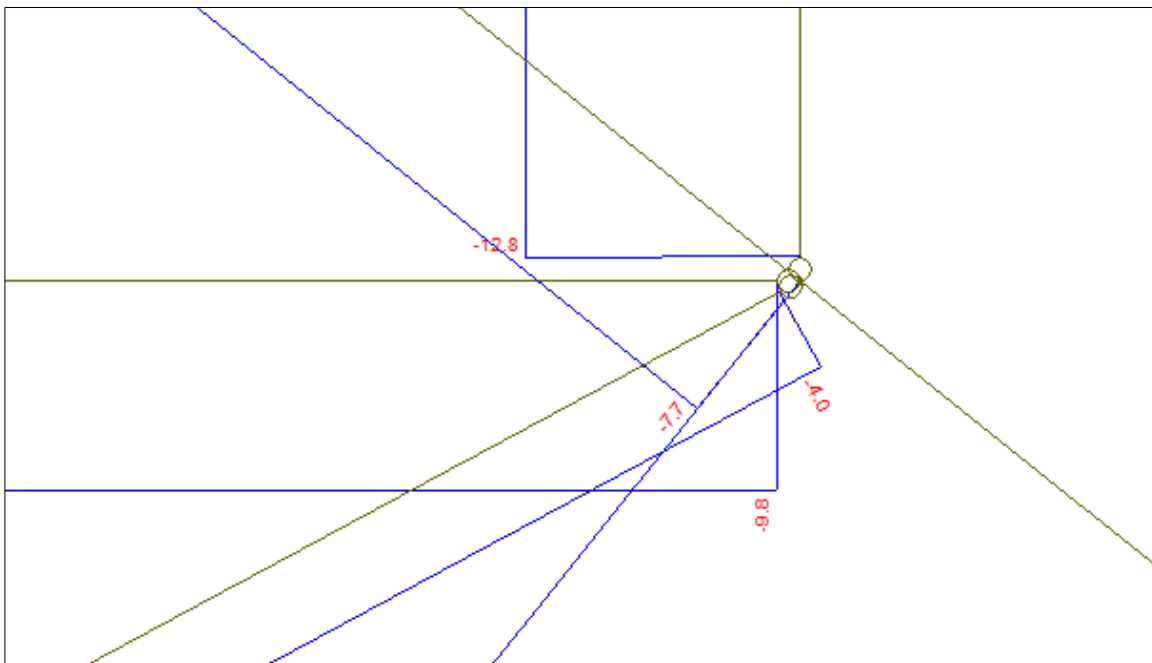


Figura 56 – Resultados diagrama axial no nó onde liga a escora e a contra – linha;

Analisando a figura 47 podem ser retirados os seguintes valores de esforço axial, a contra - linha exerce uma força de compressão de 9.8KN na perna. Assim, este será o esforço a verificar no calculo através da folha de calculo mostrada anteriormente. A ligação é dupla com cavilha metálica de 12mm. As dimensões da perna são 220mm de altura por 120mm de largura, enquanto a contra - linha tem duas peças de 80mm de largura com 200mm de altura. A contra - linha faz com a perna um angulo de 36°.

Quadro 2 – Exemplo de calculo para a ligação anterior;

Dimensionamento ligações madeira-madeira por parafuso (ligação dupla)							
Dados e dimensões				un			
	t1(ext)	80	mm				
	t2 (int)	120	mm				
	d	12	mm				
$f_{h,0,k}$	23,0912	$f_{h,1,k}$	23,09	MPa			
d	12	$f_{h,2,k}$	15,11	MPa	Kmod	0,6	
p_k	320				γ_m	1,3	
$M_{y,R,k}$	69070,88	β	1,528601999	ad	$f_{c,90,k}$	2,2	N/mm ²
$f_{u,k}$	360				$F_{ax,RK}$	3649,274	N
					$\Phi_{cavilha}$	30	mm
					$\Phi_{parafuso}$	12	mm
					$F_{ax,RK}/4$	912,3185	N
$f_{h,\alpha,k}$	23,0912						
	valores para K_{90}	1,53	resionosas				
		0,234	LVL				
		0,162	folhosa				
	α_1	0	RAD	α_2	0,628318531	RAD	
Modo rotura tipo 1A		0	°		36	°	
	$F_{v,Rk,1A1}$	22167,552	N				
	$F_{v,Rk,1A2}$	10876,38509	N				
Modo rotura tipo 2							
					Valor max		
$F_{v,Rk,2}$	9228,215492	N			$F_{v,Rk,2}/4$	2307,0539	N
	$F_{v,Rk,2}$	10140,534	N				
Modo rotura tipo 3							
					valor max		
$F_{v,Rk,3}$	7823,411628	N			$F_{v,Rk,3}/4$	1955,8529	N
	$F_{v,Rk,3}$	8735,730135	N				
	Resistencia final caracteristica			Resistencia de calculo			
		10140,534	N				
		20,281	KN				
						9,36	KN

Com os dados introduzidos na folha de cálculo anteriormente apresentada foi possível chegar a um valor resistente de cálculo de 9.36KN na ligação dupla com parafuso. É um valor muito próximo do valor de 9.8KN calculados pelo programa de cálculo FTOOL, no entanto o valor a que se chegou pela folha de cálculo está muito afectado por factores redutores.

4. ENSAIOS REALIZADOS

A fim de prever os resultados dos ensaios, bem como de aferir da adequação do modelo de calculo proposto pelo EC-5 ordenou-se em folha de cálculo como se representa na Quadro 3 , a determinação das resistência e dos deslocamentos previsto para o ensaio.

Quadro 3 – Quadro de cálculo de ligação dupla de acordo com EC-5;

Ligação madeira-madeira, ao corte, com um parafuso ou uma cavilha, a eixos									
Previsão de valores de ensaio									
Em DUPLO plano de corte - simetria									
Resistência do plano ao corte:									
$\gamma M = 1,30$		$F_{v,Rk1} = 18931$	N						
		14563							
$k_{mod} = 1,00$	0,7692	$F_{v,Rk2} = 20048$	N						
		15422							
1-resin. 2- fol. -> 2	-	$F_{v,RkJa} = 10405$	N						
$\rho_k = 860$	kg / m ³	$F_{v,RkJb} = 13385$	N						
$\rho_m = 860$	kg / m ³	$F_{v,RkC} = 4823$	N						
$f_c, 90, k = 7,20$	N/mm ²	3710							
		$F_{v,Rka} = 13657$	N						
1-paraf. 2- cav. -> 1	-	10505							
		$F_{v,Rkb} = 19241$	N						
$f_{u,d lig} = 640$	MPa	14801							
		$F_{v,Rk plano} = 13657$	N	27314,2 N					
diâmetro lig = 10,60	$\phi \leq 30 mm$	$F_{v,Rdpl} = 10505$	N	Final	27,3	KN			
diâmetro anilha = 36	$\geq 3 \phi$								
espessura anilha $\geq 2,0$	mm	Resist. ao corte (2pl):							
		$F_{v,Rd} = 21011$	N						
alt. secções 1 h = 100	mm								
Resist. esmagamento:									
alt. secção 2 h = 100	mm	$\beta = 1,059$	-						
em t1									
espessura t1 = 30	mm	$f_{h\alpha k} = 59,53$	N/mm ²						
42,4	56,2	mm	em t2	45,79	$R_{sia \alpha t1 d} = 2588$	N			
$\parallel t_i \geq \perp t_i \geq$				$f_{h\alpha k} = 63,04$	N/mm ²	$R_{sia \alpha t2 d} = 3652$	N		
63,6	84,8	mm		48,50					
espessura t2 = 60	mm	$f_{h0k} = 63,04$	N/mm ²						
		$k_{90} = 1,06$	-						
ângulo $\alpha t1 = 90$	°	48,50							
Resist. ao fendimento, perp. fio:									
ângulo $\alpha t2 = 0$	°	$R_{190d} = 3231$	N, em uma peça	$K_{sia \parallel} = 3320$ N/mm					
		Válido p/ Resinosas							
$F_{axRk} = 19293$	N	$R_{290d} = 6462$	N						
		Válido p/ Resinosas							
módulo de escorregamento (/face):									
$M_{yRd} = 120000$	N.mm								
$V_{y d} = 45$	N	$K_{ser} = 11623$	N/mm	estimativa do escorreg. instantâneo, por face: $u_{inst} = 1,603$ mm					

Na figura seguinte é apresentado o esquema de montagem dos ensaios realizados, trata-se de um esquema muito simples mas eficaz. Uma prensa hidráulica com capacidade de 200KN em carregamento vertical, exercendo força numa ligação entre duas peças de madeira. A peça de madeira é constituída da seguinte forma: um peça orientada na vertical com dimensões 200x60x100mm à qual é requerida resistênciã em compressão paralela às fibras e uma segunda peça que é composta por duas peças de secção 450x30x100mm que resistem em flexão. A ligação entre as peças é do tipo parafuso de 12mm de diâmetro. Os apoios são metálicos sem impedimento à rotação para livre deformação das duas peças com orientação horizontal e têm uma área de apoio nas peças de 50x30mm. O parafuso que faz a ligação entre as duas peças está localizado no centro das peças, a 50mm de altura e 225mm no comprimento. Tratando-se de um parafuso, as porcas de aperto não foram sujeitas a tal força que esmaga-se a peça de madeira no contacto entre anilha – madeira, estes foram apenas encostados. As anilhas colocadas têm diâmetro interior de 12mm e exterior de 36mm, servindo como zona de transição entre porca e madeira, atenuando assim o esmagamento do elemento mais vulnerável, a madeira por aumento da área de contacto.



Figura 57 – Esquema de montagem dos ensaios;

Na figura seguinte é apresentado o equipamento utilizado para realizar os ensaios, tratando-se de uma prensa hidráulica com controlo de avanço com capacidade até 200kN.



Figura 58 – Prensa utilizada nos ensaios;

4.1. REGISTO DE HUMIDADE DA MADEIRA ENSAIADA



Figura 59 – Higrómetro;

A humidade é um factor com importância elevada em peças de madeira, pelo que o seu valor foi contabilizado medindo valores peça a peça. O aparelho utilizado foi o apresentado na figura 59. O processo de medição da humidade na peça de madeira é simples, porém obedece a uma determinada afinação. No aparelho é possível identificar três manípulos distintos, nos quais se mudam as posições consoante o que é indicado em Quadros fornecidas pelo fabricante. Para o estudo em causa, para madeiras de pinho e eucalipto colocam-se os manípulos x na posição 5 e y na posição 6 para madeira de pinho e $x=4; y=6$ para madeira de eucalipto, é ainda colocada a temperatura ambiente, na qual foi considerado o valor de 15°C.

Na medição é necessário que o eléctrodo seja inserido no interior da peças de madeira com o auxílio de um punção, este deve ficar inserido até metade da altura do eléctrodo. Por fim foram registados os valores medidos e calculada a média de humidade nas peças de madeira e eucalipto chegando-se a valores de 17.3% para madeira de pinho e 17.6% para madeira de eucalipto conforme é apresentado na Quadro 4 respectiva aos ensaios realizados e a média calculada. De salientar que os valores se encontram relativamente altos.

Quadro 4 – Registo de medições de humidade;

Pinho		Eucalipto
18,5	1	17,8
18,7	2	17,9
16,9	3	17,8
16,9	4	17,0
16,5	5	17,5
16,5	6	
17,3	med	17,6
x=5 y=6		x=4 y=6

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES ENSAIADOS

4.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

De maneira a conseguir adaptar a folha de cálculo elaborada com base no E.C.5 é necessário obter dados em relação à resistência perpendicular às fibras da madeira, o $f_{c,90}$. No entanto e por uma questão de fornecer uma informação completa optou-se por para além ensaiar e apresentar os resultados da resistência dos provetes à compressão perpendicular às fibras, é apresentada também a resistência paralela às fibras.

Como maneira de organização de ensaios são apresentados em Quadros de Excel com os resultados com os respectivos dados para o cálculo dos mesmos como força aplicada, área dos corpos de prova ensaiados e as tensões respectivas.

As dimensões apresentadas são em mm, a carga aplicada em KN e as tensões em MPa.

A disposição do corpos de prova em ensaio de resistência à compressão perpendicular às fibras é a mesma que quando montados para análise do comportamento da ligação, ou seja, com os 60mm aproximadamente em altura, tal como apresentado na figura seguinte, figura 60. Os ensaios foram realizados com controlo de deslocamento de 1.0mm/min.



Figura 60 – Disposição das peças ensaiadas em compressão perpendicular às fibras;

Quadro 5 – Resistência à compressão paralela às fibras pinho;

Determinação de $f_{c, 0}$								
Pinho	a	b	L	A	N lin	N u	$\sigma_{0, lin}$	$\sigma_{0, u}$
CP P1	60,5	42,2	96,0	2553	0,0	115,4	0,0	45,2
CP P2	60,5	49,4	100,7	2989	0,0	153,9	0,0	51,5
CP P3	60,5	45,9	100,4	2777	0,0	120,7	0,0	43,5
CP P4	60,4	44,8	97,7	2706	0,0	118,8	0,0	43,9
							0,0	46,0

Quadro 6 – Resistência à compressão perpendicular às fibras pinho;

Determinação de $f_{c, 90}$											
Pinho	a	b	L	A	N lin	N u	$\sigma_{0, lin}$	$\sigma_{0, u}$	b fin, def	$\beta_{fin 90}$ [%]	
CP P5	30,5	49,0	95,6	2916	12,1	16,9	4,2	5,8	41,0	163,3	
CP P6	30,5	49,5	92,4	2818	7,6	9,1	2,7	3,2	40,5	181,8	
CP P7	30,3	49,2	92,4	2800	12,2	12,8	4,4	4,6	40,5	176,8	
CP P8	30,4	49,1	95,4	2900	8,0	11,0	2,8	3,8	40,5	175,2	
							3,5	4,4	40,6	174,3	

Quadro 7 – Resistência à compressão paralela às fibras eucalipto;

Determinação de $f_{c, 0}$								
Eucalipto	a	b	L	A	N lin	N u	$\sigma_{0, lin}$	$\sigma_{0, u}$
CE P1	59,2	49,0	100,0	2901	0,0	161,5	0,0	55,7
CE P2	60,0	46,0	102,0	2760	0,0	131,0	0,0	47,5
CE P3	59,3	50,5	101,2	2995	0,0	160,0	0,0	53,4
CE P4	59,4	44,0	96,0	2614	0,0	121,3	0,0	46,4
							0,0	50,7

Quadro 8 – Resistência à compressão perpendicular às fibras eucalipto;

Determinação de f_c , 90										
Eucalipto	a	b	L	A	N lin	N u	σ 90, 1	σ 90, 2	b fin, def	ϵ fin 90 [%]
CE P5	29,0	47,0	96,2	2790	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	148,9
CE P6	29,0	48,0	97,0	2813	13,9	22,7	5,0	8,1	40,5	156,3
CE P7	30,0	47,0	95,0	2850	25,1	34,4	8,8	12,1	42,0	106,4
CE P8	30,0	47,5	96,0	2880	22,1	29,1	7,7	10,1	42,0	115,8
							7,2	10,1	41,5	126,1

Analisando as Quadros 6 e 8, respectivas aos ensaios dos corpos de prova em compressão perpendicular às fibras para pinho e eucalipto respectivamente conclui-se que os resultados para pinho, tal como esperados são inferiores aos obtidos para madeira de eucalipto.

Foi obtida assim uma resistência limite média correspondente ao limite da deformação elástica para pinho de 3.5MPa e de 7.2MPa para madeira de eucalipto. Em termos de resistência máxima das peças já em patamar de deformação plástica foram obtidos valores médios de 4.4MPa para madeira de pinho e de 10.1MPa para madeira de eucalipto.

4.3. DENSIDADE DA MADEIRA

Para cálculo da densidade da madeira ensaiada foram pesados os 16 diferentes conjuntos, para identificação mais fácil de cada conjunto, estes são abreviados com as seguintes iniciais como exemplo “P 1 4”, quer dizer o seguinte, P são as iniciais de pinho, 1 será neste caso a peça 1 de pinho e 4 será o material do ligador, 4 corresponde ao 4.6, 400MPa de resistência última e 60% do patamar de cedência, ou seja 2.4MPa.

Assim, os resultados de todas as pesagens, incluindo a pesagem dos ligadores para descontar ao peso do conjunto encontram-se na Quadro 9.

Quadro 9 – Cálculo da densidade média da madeira de pinho e eucalipto;

Peça	Peso, total (g)	Peso (g)	densidade (kg/m ³)	
P 1 4	2346	2136	550	
P 2 4	2168	1958	504	
P 3 4	2283	2073	533	
P 4 4	2390	2180	561	
P 1 8	2368	2193	564	Densidade média Pinho 560
P 2 8	2432	2257	581	
P 3 8	2300	2125	547	
P 4 8	2654	2479	638	
E 1 4	3310	3100	798	
E 2 4	3662	3452	888	
E 3 4	3534	3324	855	
E 4 4	3543	3333	858	
E 1 8	3725	3550	913	Densidade média Eucalipto 860
E 2 8	3498	3323	855	
E 3 8	3536	3361	865	
E 4 8	3483	3308	851	

Quadro 10 – Cálculos auxiliares para obtenção de volume da peça e descontos de pesos;

Peças	Volume
2 x 30 x 100 x 450	0,003886
1 x 60 x 100 x 200	

Peso ferragens:	(g)
Conjunto 4	210
Conjunto 8	175

A densidade média da madeira de pinho ensaiada é de 560 Kg/m³ e a da madeira de eucalipto de 860 Kg/m³. Desta maneira estão obtidos todos os valores necessários para colocar na folha de cálculo baseada no E.C.5 de maneira a fazer a mais aproximada comparação de dados entre o cálculo teórico e os resultados dos ensaios.

4.4. VALORES TEORICOS

As ligações utilizadas no decorrer dos ensaios foram de dois tipos distintos. Um parafuso em aço macio feito a partir de uma varão de 12mm em aço 4.6 uma outra ligação em parafuso com diâmetros de 10.8mm roscado de uma lado com uma espiga de 10.6mm. Os valores a

considerar para os valores resistentes destes parafusos foram obtidos tendo em consideração os gráficos obtidos por ensaio em flexão aos parafusos.

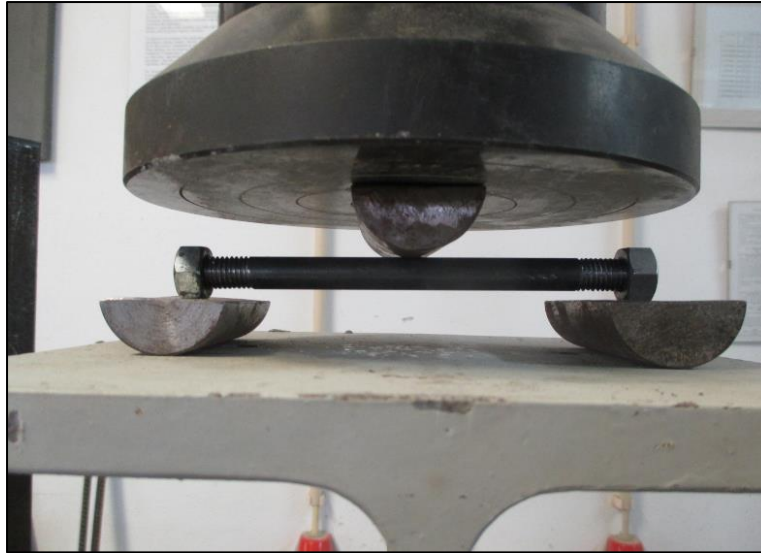


Figura 61 – Esquema de ensaio flexão parafuso 4.6;

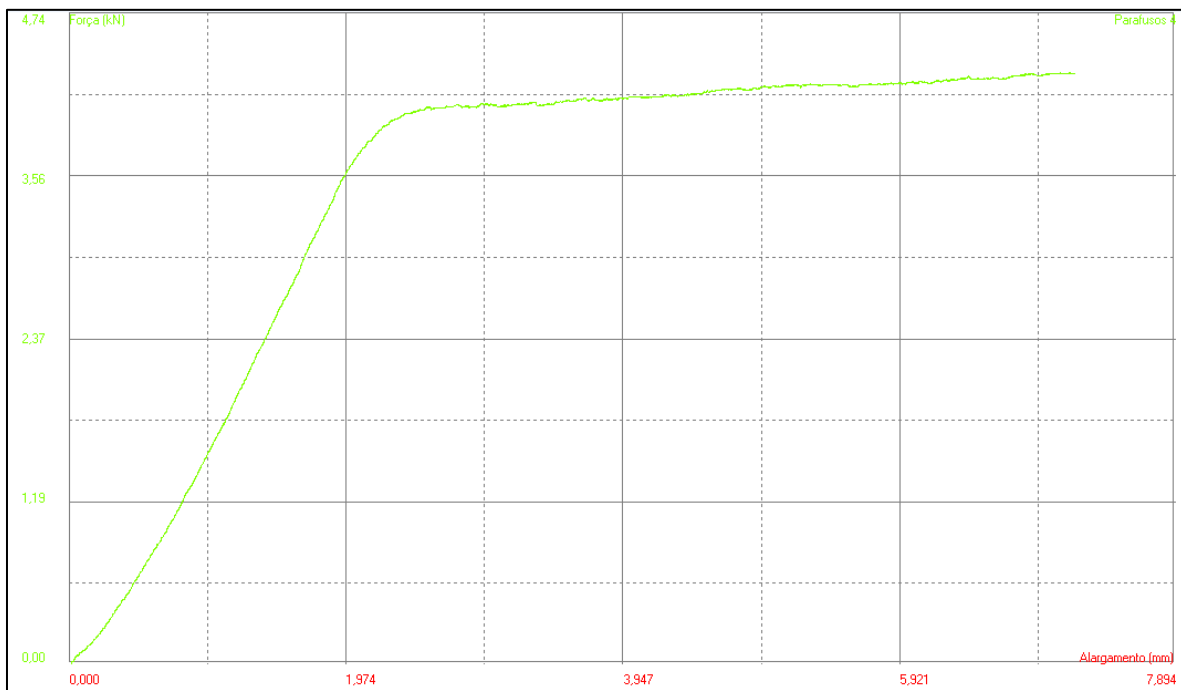


Figura 62 – Gráfico de ensaio flexão parafuso 4.6;

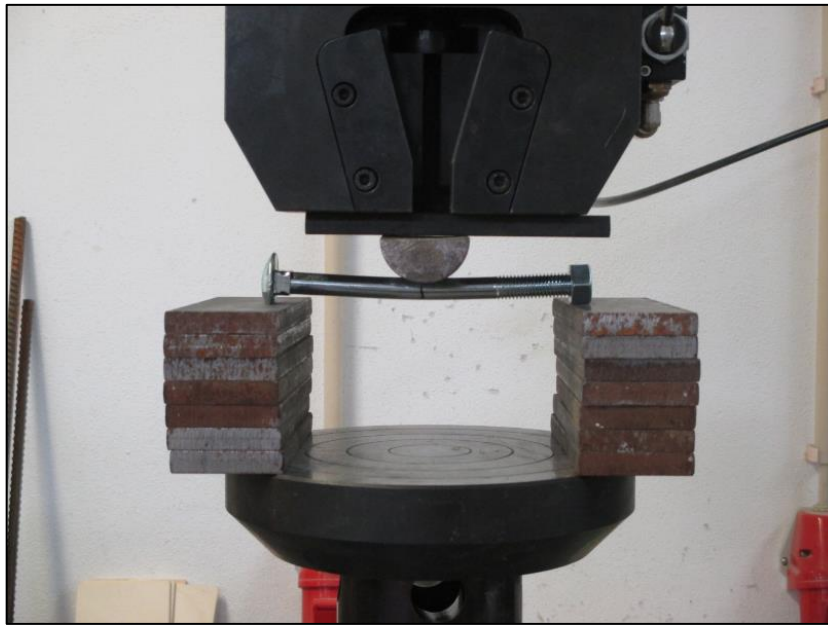


Figura 63 – Esquema de ensaio flexão parafuso 8.8;

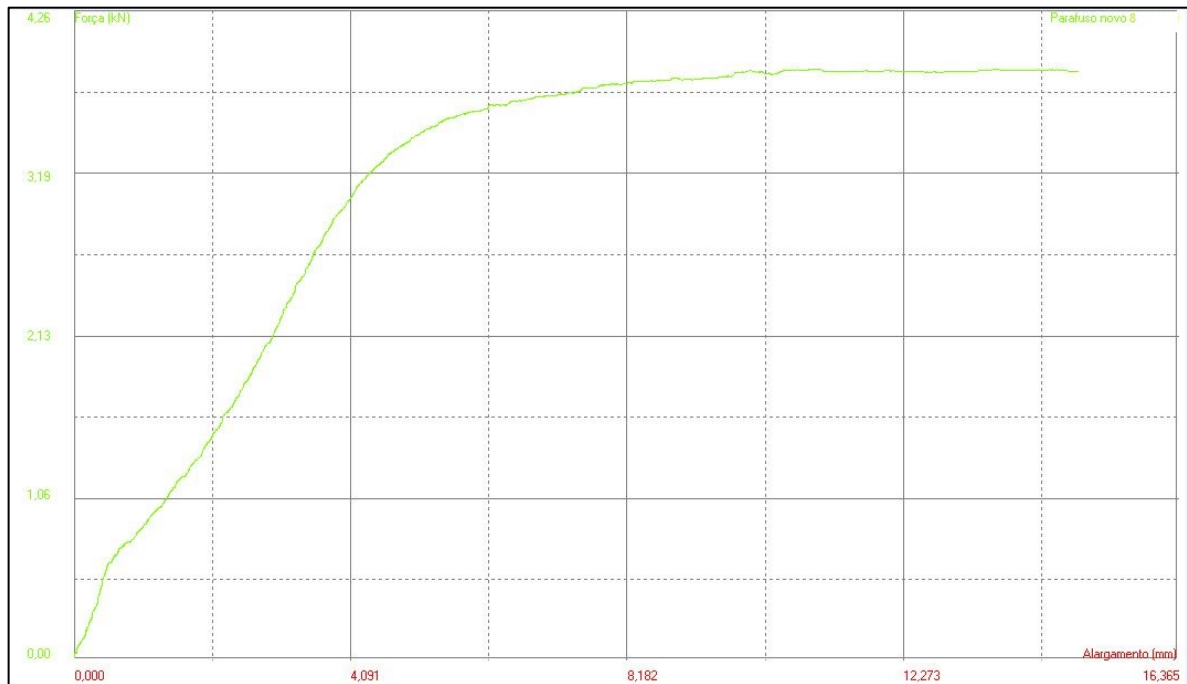


Figura 64 – Gráfico de ensaio flexão parafuso 8.8;

Nas Quadros seguintes são apresentados os valores teóricos conseguidos para a resistência da ligação dupla com madeira de pinho e eucalipto com ligação por parafuso, um em aço macio

4.6 em varão de 12mm roscado nas pontas para colocação de porcas e anilhas e outro com uma aço mais duro 8.8 com diâmetro de espiga 10.6mm. Os valores de resistência sugeridos para os ligadores utilizados são de 160 000 N.mm para o parafuso 4.6 e de 120 000N.mm para o parafuso 8.8.

Na Quadro 11 são apresentados os dados esquematizados para introduzir na folha de cálculo de modo a tirar os valores teóricos para as resistências características e deformação das ligações. Valores retirados dos ensaios anteriormente apresentados.

Quadro 11 – Valores a introduzir na folha de cálculo;

	Densidade (Kg/m ³)	f _{c,90} (Mpa)	M _y (N.mm)	V _y (N)	d (mm)
Pinho	560	3,5	...	...	...
Eucalipto	860	7,2	...	...	...
Parafuso 4,6	...	...	160 000	40 000	12
Parafuso 8,8	...	...	120 000	45 000	10,6

Quadro 12 – Valores obtidos da folha de cálculo;

Conjunto	Resistência Final (F _{v,Rk}) (KN)	u inst (mm)
Pinho + 4	19,0	1,705
Pinho + 8	17,3	1,726
Eucalipto + 4	32,2	1,627
Eucalipto + 8	27,3	1,603

4.5. RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

Os ensaios foram feitos com utilização de um total de 16 peças, respectivamente 4 peças de pinho em ligação dupla com ligador metálico do tipo parafuso utilizando um parafuso de 12mm com um aço 4.6 e 4 ligações utilizando uma parafuso 8.8 na ligação. Os restantes 8 conjuntos são respectivos a madeira de eucalipto com ensaios da mesma disposição, 4 ensaios para ligação dupla com madeira de eucalipto e parafuso 4.6 e 4 com parafuso 8.8.

O esquema utilizado para a mais acertada medição é apresentado na figura 68, na qual se encontra a prensa utilizada, os apoios da ligação, a ligação dupla constituída por três peças, na qual duas têm disposição horizontal e uma tem disposição vertical, ligadas por um ligador metálico do tipo parafuso. São ainda utilizados sensores de posição que medem o deslocamento em ambas as faces das peças e registam as leituras ao longo de todo o ensaio.

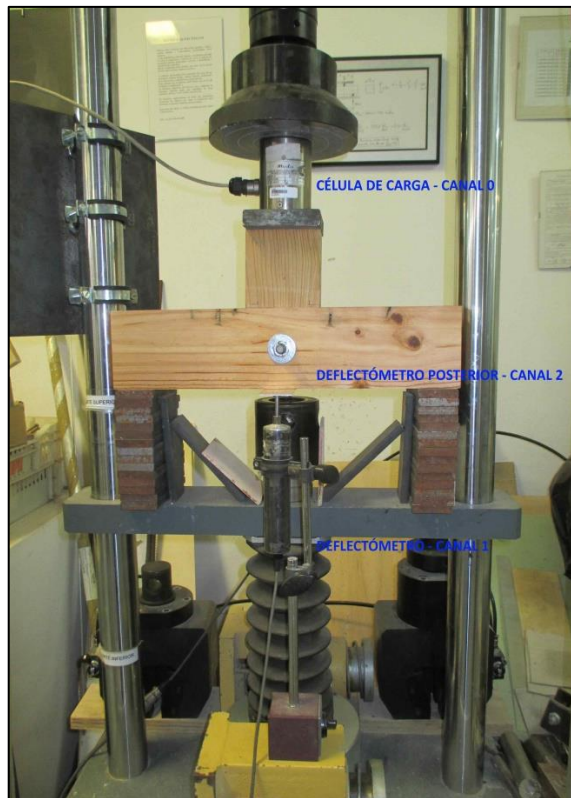


Figura 65 – Esquema de ensaios utilizado;



Figura 66 – Data logger utilizado no decorrer dos ensaios;

Na figura 68 é apresentado um gráfico tensão-deformação . As peças foram ensaiadas com controlo de deslocamento a 0.5mm/min. Os ensaios traduzem-se na forma de gráficos tensão-deformação no quais foi possível observar a distinção entre duas divisões diferentes na curva

do gráfico. A curva começa com um inclinação inicial que representa o acomodar de todos os componentes que fazem parte da ligação e a partir dessa inclinação inicial começa a deformação elástica da peça. À medida que o deslocamento vai aumentando a peça responde com uma força diferente com variação aproximadamente constante ao longo da primeira curva. A partir de determinado ponto a inclinação muda e é possível observar duas zonas distintas do gráfico. Essas zonas são, inclinação inicial corresponde à deformação elástica e inclinação final até à rotura deformação plástica. No âmbito do estudo aqui tratado importa considerar a curva inicial na qual se dá a deformação elástica da peça. De modo a ser criada uma Quadro em excel para obtenção e registo de resultados os dados relevantes são retirados dos gráficos da seguinte forma: inicialmente são identificadas as duas curvas distintas do gráfico, de seguida é traçada uma recta que acompanhe cada curva e no ponto em que a primeira recta se afasta mais da curva original para entrar em patamar de cedência retira-se esse ponto no qual se obtém um valor para força limite e o valor do deslocamento nesse ponto. Para a força máxima é feito do mesmo modo e é retirado o valor máximo atingido assim que a recta traçada se separa da curva original. Esses valores com N_{lim} , N_u e os respectivos deslocamentos são retirados e é feita um Quadro em excel com o registo dos dados para ser calculada uma média desses valores. De notar que isto é feito para 16 ensaios como referido anteriormente. Na Quadro 13 são apresentados os valores para deformação e recuperação após libertada a peça para os 16 ensaios.

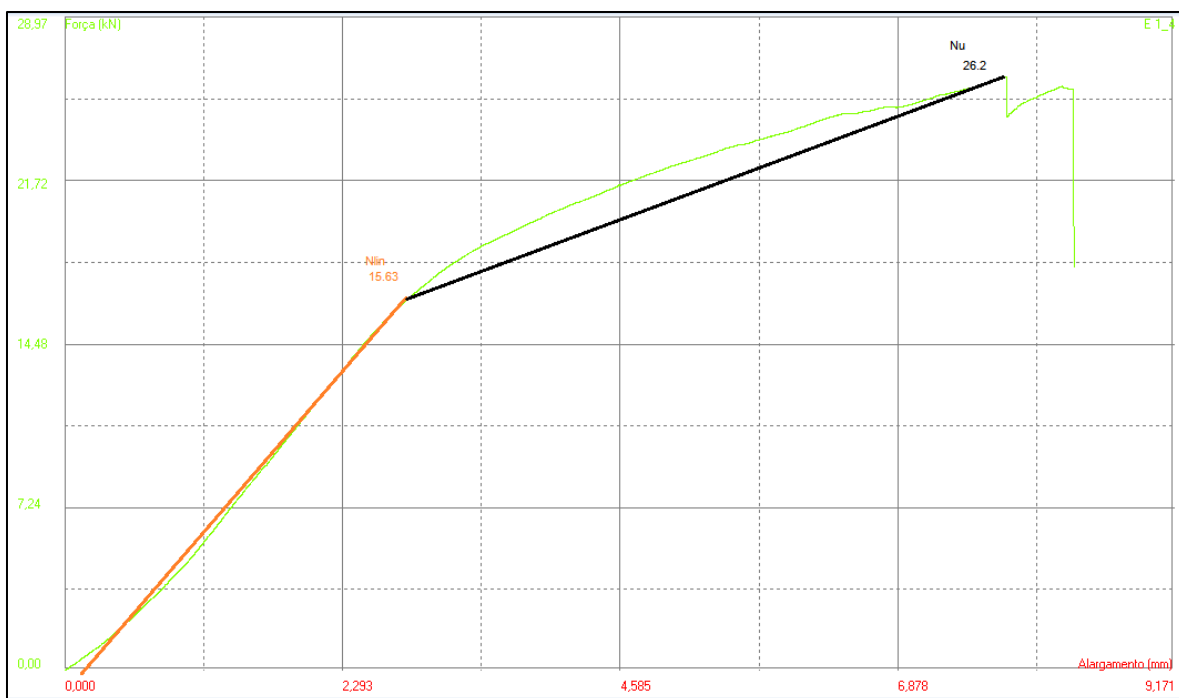


Figura 68 – Gráfico tensão deformação ligação E1_4;

Quadro 13 – Registo de deformação e recuperação;

ENSAIO	D1	R1	D2	R2	D3	R3	D4	R4	D5	R5	D6	R6	D7	R7	D8	R8	D sup	R sup	D inf	R inf	D	R
P 14	5,7	2,2	5,1	1,2	5,4	2,0	4,2	0,9	4,3	1,4	5,1	1,3	4,6	1,2	4,6	0,8	5,1	1,6	4,7	1,2	4,9	1,4
P 24	7,0	3,5			7,1	3,3			5,3	2,4	6,6	1,4	5,1	2,4	5,4	1,4	7,1	3,4	5,6	1,9	6,3	2,7
P 34	5,4	2,6	3,5	2,3	5,3	2,8	3,6	2,5				2,0				1,9	4,5	2,6		2,0	4,5	2,3
P 44	3,0	1,3	3,7		2,8	1,4	3,8			0,9				1,2			3,3	1,4		1,1	3,3	1,2
P 18	6,4	1,4	6,7	1,9	6,5	1,5	6,6	2,0	6,1	1,6	5,3	1,4	6,1	2,1	6,2	1,9	6,6	1,7	5,9	1,8	6,2	1,7
P 28	6,9	1,9	6,6	1,7	6,8	2,1	6,7	1,8	6,2	1,9	6,0	1,8	6,2	2,0	5,9	1,9	6,8	1,9	6,1	1,9	6,4	1,9
P 38	8,3	2,0	8,9	1,6	7,9	1,6	8,8	1,5	6,3	0,6	8,8	1,7	7,4	1,5	8,8	1,8	8,5	1,7	7,8	1,4	8,2	1,5
P 48	12,3	2,0			12,4	2,0			11,0	1,4	12,1	2,4	11,4	2,4	12,1	2,5	12,4	2,0	11,7	2,2	12,0	2,1
E 14	6,0	1,5	6,8		6,0	1,5	6,5		5,0	1,0	5,0	1,0	5,0	1,5	5,0	0,7	6,3	1,5	5,0	1,1	5,7	1,3
E 24	4,0	1,0	4,5	0,8	3,5	1,0	4,5	1,0	3,2	0,8	4,0	0,8	3,5	1,0	4,0	1,0	4,1	1,0	3,7	0,9	3,9	0,9
E 34	4,0	1,0	4,2	0,8	4,0	1,0	4,0	1,0		1,2		1,2		1,0		1,0	4,1	1,0		1,1	4,1	1,0
E 44	3,0	1,0	3,0	0,8	2,5	0,8	2,8	1,0			3,0	0,8			3,0	0,8	2,8	0,9	3,0	0,8	2,9	0,9
E 18	5,0	1,5	5,0		5,2	1,5	5,0		4,5	0,8	5,0	0,8	4,5	1,0	5,0	1,0	5,1	1,5	4,8	0,9	4,9	1,2
E 28	5,5	0,8	5,5	0,8	5,5	1,0	6,5			0,4		1,0		1,0		1,0	5,8	0,9		0,9	5,8	0,9
E 38	5,2	1,4	5,5	1,2	5,4	1,2	5,5	1,2	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0		0,8	5,4	1,3	5,0	1,0	5,2	1,1
E 48	5,0	1,2	6,0		5,0	1,2	6,5		5,2	1,0	4,5		5,2	1,0	4,0		5,6	1,2	4,7	1,0	5,2	2,2

À esquerda é identificada a peça ensaiada e nas colunas à direita anotados os valores das deformações e recuperações das peças nas 8 posições relativas. Nas colunas mais à direita encontram-se as médias desses deslocamentos para colocar na Quadro seguinte.

Quadro 14 – Registo de deformação e recuperação médios com forças conseguidas;

ENSAIO	D sup	R sup	D inf	R inf	D	R	N lin	N u	D	R	N lin	N u
P 14	5,1	1,6	4,7	1,2	4,9	1,4	9,3	17,3	valores médios			
P 24	7,1	3,4	5,6	1,9	6,3	2,7	7,9	15,3				
P 34	4,5	2,6		2,0	4,5	2,3	7,6	11,9				
P 44	3,3	1,4		1,1	3,3	1,2	9,1	14,9	4,7	1,9	8,5	14,9
P 18	6,6	1,7	5,9	1,8	6,2	1,7	7,8	18,6				
P 28	6,8	1,9	6,1	1,9	6,4	1,9	8,3	16,7				
P 38	8,5	1,7	7,8	1,4	8,2	1,5	8,0	18,3				
P 48	12,4	2,0	11,7	2,2	12,0	2,1	11,9	23,8	8,2	1,8	9,0	19,4
E 14	6,3	1,5	5,0	1,1	5,7	1,3	15,6	26,2				
E 24	4,1	1,0	3,7	0,9	3,9	0,9	16,0	28,7				
E 34	4,1	1,0		1,1	4,1	1,0	14,4	27,7				
E 44	2,8	0,9	3,0	0,8	2,9	0,9	19,2	21,4	4,1	1,0	16,3	26,0
E 18	5,1	1,5	4,8	0,9	4,9	1,2	14,3	27,0				
E 28	5,8	0,9		0,9	5,8	0,9	18,0	23,8				
E 38	5,4	1,3	5,0	1,0	5,2	1,1	14,3	22,2				
E 48	5,6	1,2	4,7	1,0	5,2	2,2	14,9	19,3	5,3	1,3	15,4	23,1

Na Quadro 14 já se encontram os dados devidamente organizados com os valores de deformação e recuperação médios em mm assim como os valores da força no limite elástico “N lin” e no limite plástico “N u”. De salientar que estão apenas registados os valores da deformação para a face inferior e superior da peça vertical em ambos os lados da peça.

4.6. CASQUILHOS

Faz parte dos objectivos da presente dissertação o estudo do comportamento da madeira previamente ensaiada com as peças apresentadas na figura 69 com a utilização de casquilhos de madeira de dureza superior em substituição da zona esmagada das peças. Foi efectivamente conduzido assim o desenrolar dos ensaios, porém devido às características intrínsecas da madeira foi de grande dificuldade elaborar um casquilho a partir de uma madeira mais dura que assentasse na perfeição no orifício alargado da peça previamente ensaiada, desta maneira e pelo facto de parte do movimento induzido pela força aplicada ao conjunto ser encarregue de acondicionar o casquilho no orifício alargado o ensaio perderia qualidade. Assim foi reconsiderada essa parte importante dos ensaios e como segunda opção tendo em consideração o facto de estando a utilizar um material como casquilho diferente da madeira esse material teria de ser algo brando e sem resistência muito diferentes da madeira.

O material escolhido foi alumínio. O alumínio é fácil de trabalhar e rapidamente foram elaborados casquilhos para a realização dos ensaios. É ainda pertinente salientar que um casquilho em alumínio como reparação de zonas de ligação deterioradas seria uma boa adopção por várias razões, o alumínio não é atacado por fungos xilófagos, não apodrece, neste caso oxida mas a ritmos lentos e apenas se os ambientes forem propícios a tal, o que no caso da generalidade dos ambientes este material não ser afectado ao ponto de se deteriorar.



Figura 69 – Peça de pinho com reparação em casquilho de alumínio;

4.6.1. ENSAIOS REALIZADOS APÓS REPARAÇÃO

Após a realização dos ensaios nas peças de madeira foram então feitos casquilhos em alumínio visto a impossibilidade de os fazer em madeira, alargado o orifício nas peças de madeira, colocado o casquilho e com novos ligadores realizados os ensaios. Os casquilhos produzidos têm um comprimento de 30 e 60mm consoante a peça de madeira onde será colocado, diâmetro interior de 12mm e diâmetro exterior de 30mm. De salientar que no decorrer dos ensaios com as peças reparadas a madeira das peças já se encontrava algo deteriorada apresentando fissuração indesejada para o efeito. Por essa razão e pelo facto de tempo útil disponível ser reduzido foi possível realizar apenas 4 ensaios com peças reparadas. A existência de demasiadas peças fissuradas e a número reduzido de casquilhos assim o condicionou. Poderiam porém ter sido realizados mais ensaios com estas peças reparadas, mas o mesmo seria inviável pelo facto da fissuração existente nas peças vir a causar resultados não fidedignos. O que poderá ser tomado em consideração dado que se esperava uma resistência superior com a adopção de casquilhos de reparação.

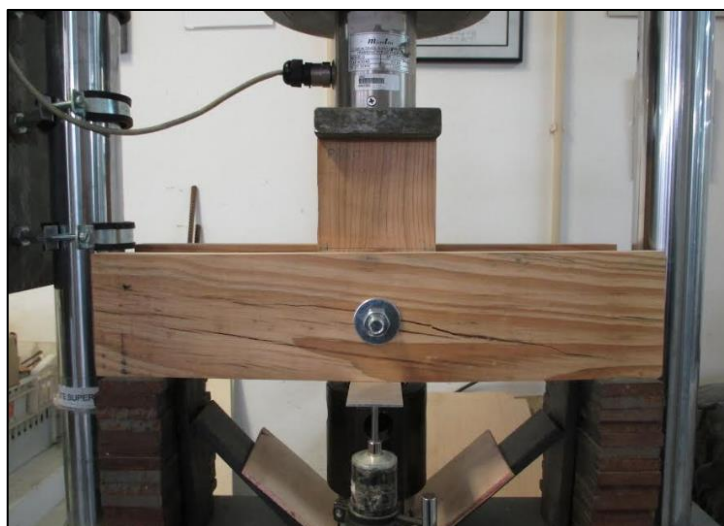


Figura 70 – Peça reparada com fenda expressiva;

Quadro 15 – Registo de deformação e recuperação madeira reparada;

ENSAIO	D1	R1	D2	R2	D3	R3	D4	R4	D5	R5	D6	R6	D7	R7	D8	R8	D sup	R sup	D inf	R inf	D	R
P 24 C	3,6		3,2	2,5	3,5		3,8	2,5			1,3		1,1		0,9		3,5	2,5	1,1	0,0	2,3	1,3
P 28 C	8,5	2,3	8,4	1,8	8,7	2,3	8,6	1,0		1,4	5,2	1,0	5,1	1,2		1,0	8,6	1,9	2,6	1,2	5,6	1,5
E 24 C	3,4	2,3	2,1		3,6	2,5	2,1	1,7	1,1				2,1		1,1		2,8	1,6	1,1	0,0	1,9	0,8
E 34 C8	5,1	1,8	4,8	2,7	5,1	1,8	4,8	2,7	0,8								5,0	2,3	0,2	0,0	2,6	1,1

Quadro 16 – Registo de deformação e recuperação médios com forças madeira reparada;

ENSAIO	D sup	R sup	D inf	R inf	D	R	N lin	N u
P 2 4 C	3,5	2,5	1,1	0,0	2,3	1,3	7,9	15,3
P 2 8 C	8,6	1,9	2,6	1,2	5,6	1,5	8,3	16,7
E 2 4 C	2,8	1,6	1,1	0,0	1,9	0,8	16,0	28,7
E 3 4 C8	5,0	2,3	0,2	0,0	2,6	1,1	14,4	27,7

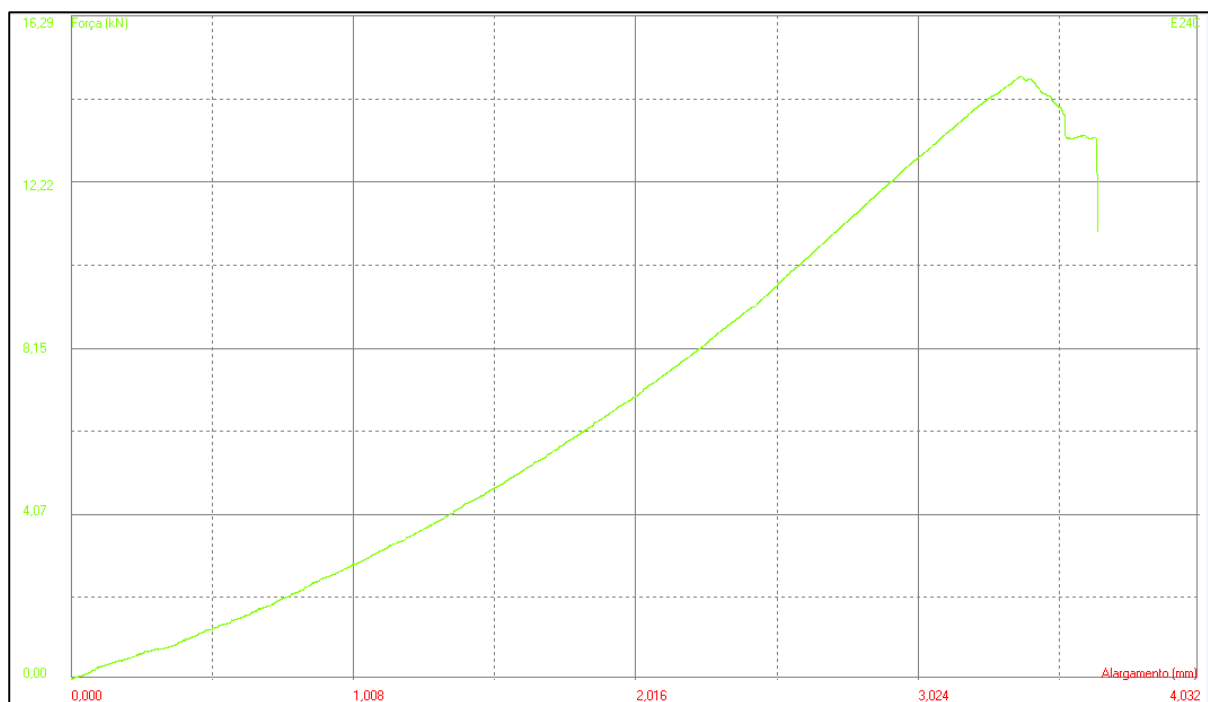


Figura 71 – Gráfico tensão deformação peça reparada E24C;

Na figura 71 é possível observar a curva de deformação da peça E24C, com casquilho em alumínio como reparação da zona afectada anteriormente, a curva tem uma curva muito uniforme não apresentando patamar de deformação plástica. Devido a inexistência de patamar de cedência pode concluir-se que a ligação com casquilho metálico neste caso é uma ligação mais rígida. Nas figuras seguintes encontram-se apresentados os três restantes ensaios. É possível notar zonas de descontinuidade no gráfico correspondes a fendas impostas pela tensão nas peças.

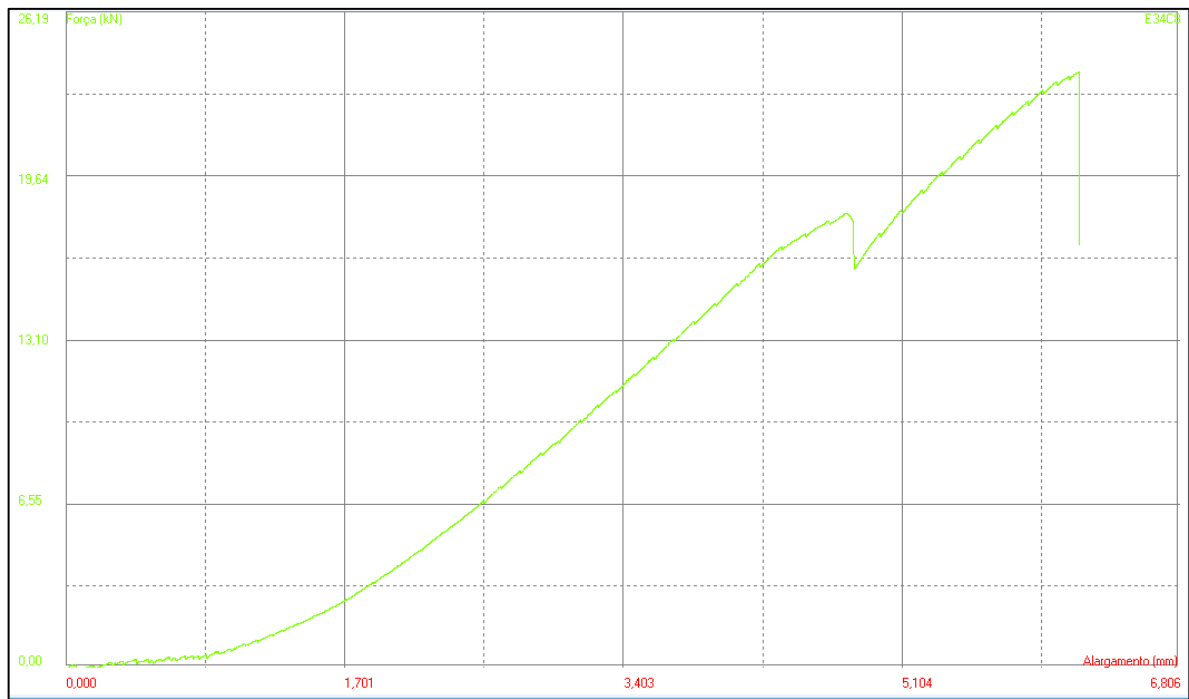


Figura 72 – Gráfico tensão deformação peça reparada E34C8;

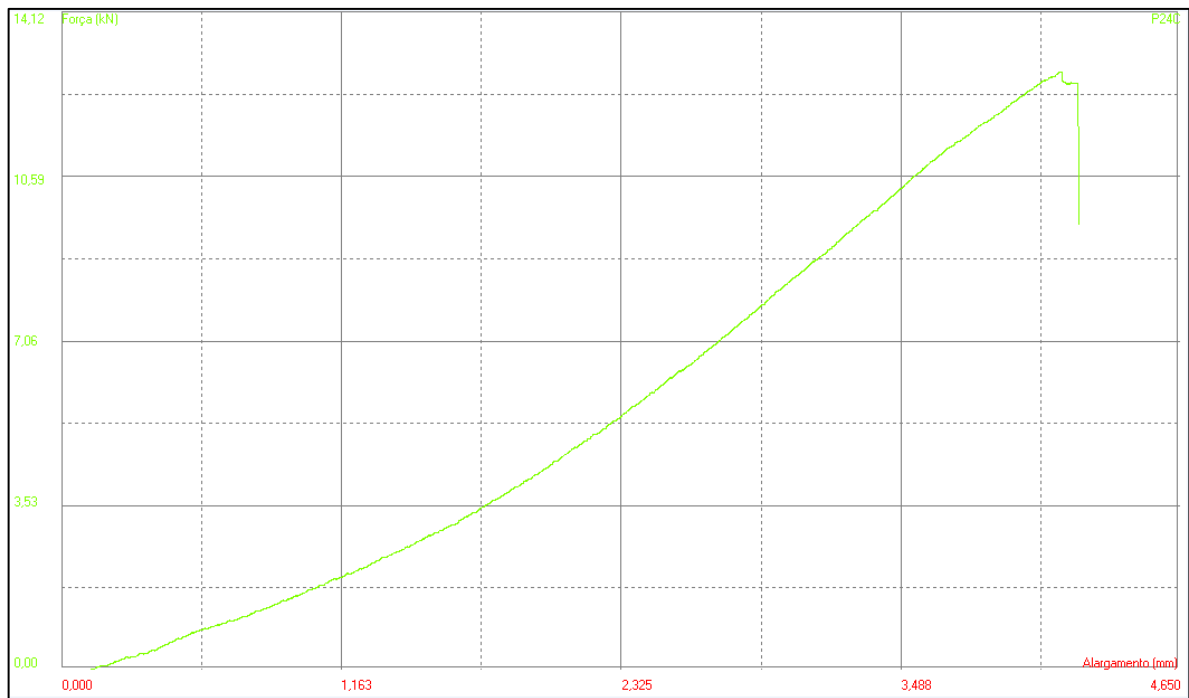


Figura 73 – Gráfico tensão deformação peça reparada P24C;

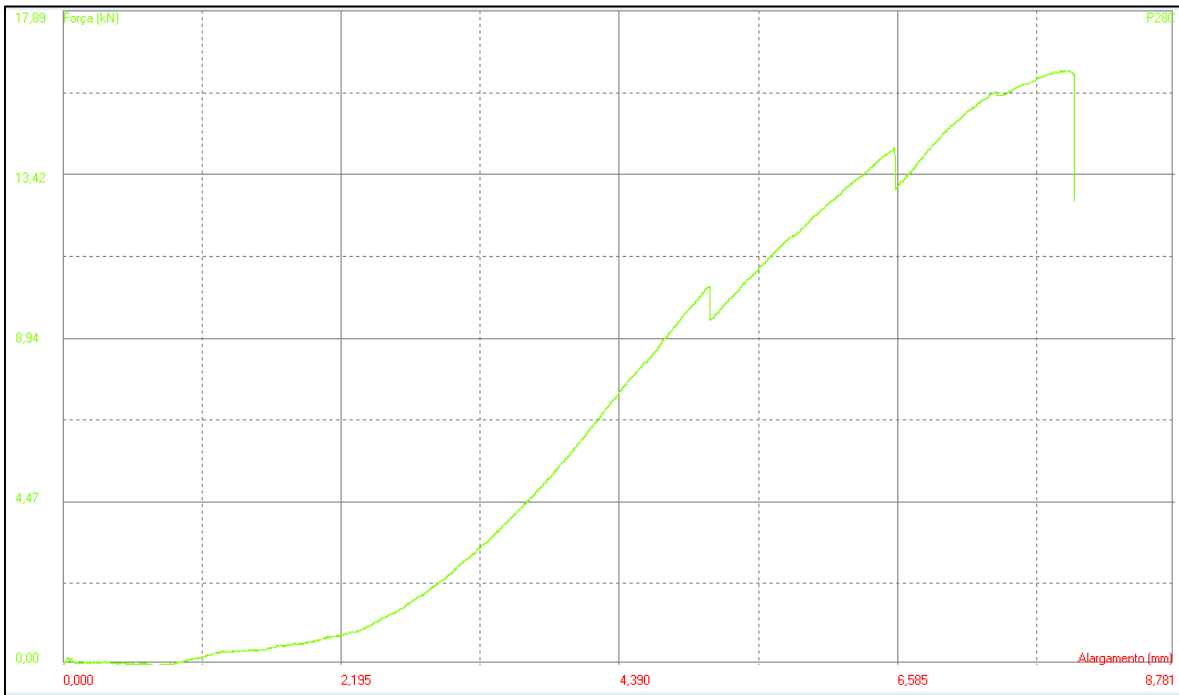


Figura 74 – Gráfico tensão deformação peça reparada P28C;

5. CONCLUSÕES

Comparativamente com o modelo de cálculo teórico os resultados obtidos nos ensaios não são aproximados aos esperados. As diferenças são maiores principalmente no campo dos deslocamentos por deslizamento relativo das peças, mas provavelmente a expressão estará calibrada para atender a um nível de esforço de cálculo e não real.

No campo das resistências da ligação os valores não fazem disparidades muito altas mas no entanto não encaixam entre si e em casos que se esperava por exemplo no pinho com parafuso tipo 4 se esperava uma resistência superior ao parafuso tipo 8 o mesmo não aconteceu, traduzindo-se no contrário.

Após o ensaio do pinho e dado que os valores de densidade e resistência à compressão do eucalipto serem expressivamente maiores esperava-se uma resistência da ligação muito superior, no entanto sendo superior na mesma não se obtiveram valores esperados com uma diferenciação tão grande.

Na peça de pinho com parafuso tipo 4 a resistência foi menor que para o parafuso tipo 8. No caso das peças de eucalipto o parafuso tipo 4 teve melhor desempenho.

Relativamente aos resultados da reparação com casquilho de alumínio, verificou-se que com a exceção de apenas um caso a carga correspondente ao valor linear foi atingida e ultrapassada, notando-se até um maior campo do comportamento linear, embora os valores últimos tenham sido ligeiramente inferiores aos valores obtidos nos primeiros ensaios.

Esta situação poderá justificar-se pelo facto de, eventualmente, as peças se encontrarem fragilizadas devido aos primeiros ensaios. Mesmo assim, os valores andaram muito próximos dos conseguidos nos ensaios anteriores.

Em síntese podemos dizer que a técnica de reparação é eficaz pois foram largamente ultrapassados os valores correspondentes ao comportamento linear, com menores escorregamentos das peças, atingindo-se valores muito próximos dos valores originais de rotura.

6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros seria de todo interessante desenvolver sistemas de ligação dupla com casquilhos metálicos ou pelo menos dar continuidade ao estudo iniciado na dissertação em relação a essa técnica de reforço.

O aprofundar do tema englobando outras espécies de madeira seria interessante dado que em construção antiga nomeadamente em asnas de cobertura se encontram espécies como carvalho, madeiras mais duras.

Um ponto interessante de desenvolvimento, seria ensaiar a técnica de reparação em peças novas comparando este comportamento com o que foi obtido no primeiro conjunto de ensaios. Isto permitiria caracterizar melhor a capacidade da técnica de reparação testada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim Faria, J. (2002). *Reabilitação de Coberturas em Madeira em Edifícios Históricos*. In Seminário A intervenção no Património: Práticas de Conservação e Reabilitação, FEUP, Porto;
- Branco, J.; Cruz, P.; Piazza, M. (2006). *Asnas de madeira, a importância da rigidez das ligações*. Jornadas Portuguesas das Engenharias de Estruturas 4ª edição, Lisboa;
- Branco, J.; Cruz, P.; Varum, H.; Piazza, M. (2006). *WCTE2006- Behaviour of Traditional Portuguese Timber Roof Structures*. WCTE;
- Brites, R. (2011). *Avaliação da segurança das estruturas antigas de madeira*. Tese de doutoramento, Escola de engenharia da Universidade do Minho, Braga;
- Cachim, P. (2007). *Construções em madeira – A madeira como material de construção*. Publindústria, Edições Técnicas, Porto. ISBN 978-972-895-314-0;
- Cóias, V. (2010) – *Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*, IST Press, Lisboa;
- Correia, A.M. (2014) – *Apontamentos da disciplina de Patologias, Inspeção e Diagnóstico*, DEC, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra;
- Costa, F. (1955). *Enciclopédia Prática da Construção Civil*. Edição do autor, depositária Portugália Editora, Lisboa;
- Dias, A.; Cruz, H.; Machado, S.; Custódio, J.; Palma, P. (2009). *Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira*. Verlag Dashofer, Edições Profissionais, Unip, Lda. Lisboa. ISBN 978-989-642-065-9;
- EN 1995-1-1:2005 – Eurocode 5: Design of Timber Structures, CEN, Brussels. 2004;
- IFN, Inventário Florestal Nacional. Florestas, (2010);
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- Leonardo da Vinci Pilot Projects, (2008). Educational Material for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS, Handbook 1 – Timber Structures;
- Moliterno, A. (1981). *Caderno de Projectos de Estruturas de Telhados em Estruturas de Madeira*. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, Brasil;
- Negrão, J.; Faria, A. (2009). *Projecto de estruturas de madeira*. Publindústria, Edições Técnicas, Porto. ISBN 978-972-8953-36-2;

Soares, J. (2006). *Florestas e Eucaliptos, Mitos e Realidades*. Grupo Portucel Soporcel, Semapa, Lisboa;

Pinho, F. (2000). *Paredes de edificios antigos em Portugal*, LNEC;

Santos, C.; Jesus, A.; Morais, J.; Queirós, E.; Lima, A. *Desenvolvimento de Soluções de Reforço em Ligações de Madeira do Tipo Cavilha*. Revista da associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, ISSN 1646-7078. UTAD, Vila Real;

Tiago, P.M. (2014) – *Apontamentos da disciplina de Reforço e Reabilitação de Edifícios*, DEC, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.