



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Torres Eólicas em CLT - Ligação entre Painéis a Nível das Plataformas e Juntas Verticais

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Estruturas

Autor

Marcos André Marta Bento

Orientadores

Prof. Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão

Prof. Doutor Luís Filipe de Carvalho Jorge

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Dezembro, 2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, porque é o seu devido posto, agradeço à minha família e a Deus. À minha querida mãe obrigado por tudo, e hoje o que sou a ti o devo. Ao meu pai, à minha "Mãe 2", à minha avó,... Obrigado a todos sem exceção.

Um sentimento especial com o meu avô José Luiz Marta. Sempre lutas-te, acreditas-te e sei que esta vitória é tão importante para mim como é a alegria que a ti provoca. És um exemplo de homem, pai e avô.

Agradeço aos meus orientadores Professor João Negrão e Professor Luís Jorge pelos ensinamentos prestados e confiança depositada. Tudo é impossível até ser realizado.

O meu obrigado aos colegas Francisco Simões, Carlos Martins e André Marques pela preciosa ajuda prestada na construção da aduela.

Ao Jorge Cardoso, Lino Pessoa e Patrícia Nunes. São dos melhores amigos que alguém pode ter. Sou um privilegiado por os ter para a vida.

Aos meus amigos e irmãos João Gil, Gonçalo Lima e António Moreira obrigado pela amizade e apoio ao longo de todo este percurso.

À Filipa Ferreira, Rita Candeias, Sónia Duarte, Mafalda Marta e Cátia Pimenta, o meu carinho, pelas amigas que são e mostraram ser.

Rita Soares e sua família. Obrigado por apareceres na minha vida. Pela amizade. És família e sinto-te como a irmã que sempre quis ter.

À Inês. Pelo que significas para mim, pelo ser humano que és, e por ao longo deste percurso me "picares", dares força e aconselhares, em todos os momentos difíceis. Mas sobretudo, pelos lindos sorrisos, nas vitórias alcançadas.

Dedicado à Maria Pedro

RESUMO

A construção de torres eólicas em CLT (madeira lamelada colada) afigura-se viável e economicamente competitiva, havendo já um sistema comercializado no mercado europeu.

Encontra-se em estudo, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, um sistema construtivo alternativo ao anterior, que se crê apresentar algumas vantagens comparativas. No presente trabalho, será ensaiada uma aduela hexagonal de CLT, na qual os painéis individuais são solidarizados por dois sistemas de pré-esforço. Um é realizado por tensão perimetral de um conjunto de cabos, destinando-se a ser utilizado em níveis intermédios entre plataformas. O outro, sobre o qual este trabalho incide, consiste na aplicação de pré-esforço por aperto de varões roscados que desempenham simultaneamente o papel de apoios dos painéis que constituem as plataformas se serviço, que constituem ainda diafragmas rígidos, colocados a alturas regulares, com o objetivo de impedir o modo de deformação por distorção da secção hexagonal.

Complementarmente, é feito um estudo preliminar das tensões de corte nas juntas verticais interpainéis, com o propósito de determinar se se conseguirá obviar a estas com o pré-esforço perimetral referido ou se haverá necessidade de recorrer a dispositivos físicos (colagem) ou mecânicos (ligadores) adicionais.

ABSTRACT

The building of wind towers made of cross laminated timber seems to be quite viable as well as economically competitive and there's already one marketed system in the European market.

Presently, there's a study going on in the Civil Engineering Department, University of Coimbra, where an alternative building system is believed to present some comparative advantages. In this present work, there will be tested an hexagonal CLT dowel, where individual pannels are welded by two pre stressing systems. One is done through perimetral tension of a group of cables in order to be used in intermediate levels between platforms. The other, focus of this project, consists on the pre stressing usage by tightening of screwed rods which support the pannels that assemble the service platforms and the rigid diaphragms put at regular heights, viewing the prevention of a deformation mode caused by distortion of the hexagonal section.

At the same time, a preliminar study of shear stress in the vertical interpannels joints is done in order to ensure they don't happen with the perimetral pre stress mentioned or if, on the other way, there is a need to look for support from physical devices (sticking) or additional mechanic ones (couplers).

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento Geral	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	A Origem das Torres Eólicas.....	3
2.2	Aerogeradores	4
2.3	Tipos de Torres	6
2.3.1	Torres em aço soldado	6
2.3.2	Torres em aço aparafusado	7
2.3.3	Torres em betão armado	8
2.3.4	Torres híbridas de aço e betão	8
2.3.5	Torres treliçadas	9
2.4	Torres Eólicas em Madeira	10
2.4.1	CLT - Cross-Laminated Timber.....	10
2.4.2	Torres em CLT	11
3	SISTEMA ESTRUTURAL.....	14
3.1	Modelo Construtivo Proposto.....	14
3.2	Ligações Perimetrais.....	16
3.2.1	Ligação por cabos.....	16
3.2.2	Ligação perimetral por varões pré-esforçados.....	17
4	CONSTRUÇÃO LABORATORIAL DE ADUELA.....	22
4.1	Materiais	22
4.1.1	Ensaio de tração nos varões de aço	25
4.2	Preparação Experimental	26
4.3	Montagem em Laboratório	32

5	LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS	35
5.1	Aperto das Ligações ao Nível das Plataformas.....	35
5.2	Ligação nas Juntas Verticais	42
6	CONCLUSÕES.....	50
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Moinho de vento de eixo vertical para moagem de cereais, Afeganistão (Hau,2006).....	3
Figura 2.2 - Tipos de aerogeradores (Mathew, 2006)	5
Figura 2.3 - Componentes de um aerogerador (Molina e Alvarez, 2011).....	5
Figura 2.4 - Duas seções de uma torre em aço soldado (Engström <i>et al.</i> , 2010)	6
Figura 2.5 - Torre em aço aparafusado (Engström <i>et al.</i> , 2010).....	8
Figura 2.6 - Torre híbrida em aço e betão (Engström <i>et al.</i> , 2010).....	9
Figura 2.7 - Torre treliçada (Engström <i>et al.</i> , 2010).....	10
Figura 2.8 - Madeira lamelada colada cruzada (FPInnovations, 2011).....	11
Figura 2.9 - Construção da torre (TimberTower, 2015).....	12
Figura 2.10 - Torre eólica em CLT (Windpowerengineering, 2015)	13
Figura 3.1 - Sequência de montagem de torre eólica em CLT (imagem cedida pelo Professor João Negrão).....	15
Figura 3.2 - Pormenor de ancoragem de desviador por cabos em estrutura hexagonal (imagens cedidas pelo Professor João Negrão).....	16
Figura 3.3 - Ancoragem do desviador ao nível das plataformas de serviço	17
Figura 3.4 - Esquema estrutural da plataforma de serviço (imagem cedida pelo Professor João Negrão)	18
Figura 3.5 - Pormenor de ligação entre varões roscados de aço e plataformas de serviço (imagem cedida pelo Professor João Negrão)	19
Figura 3.6 - Esquema de ancoragem (imagem cedida pelo Professor João Negrão)	20
Figura 4.1 - Dimensões dos desviadores ao nível das plataformas de serviço em metros	24
Figura 4.2 - Alturas dos entalhes a realizar nos painéis de CLT em metros	26
Figura 4.3 - Dimensões dos entalhes a realizar	27
Figura 4.4 - Dimensões dos desviadores por cabos.....	28
Figura 4.5 - Dimensões de entalhe a realizar num desviador por cabos em metros.....	28
Figura 5.1 - Denominação dos painéis e extensómetros ligados aos varões	37

Figura 5.2 - Estrutura sem comportamento monolítico (esquerda); estrutura monolítica (direita)	42
Figura 5.3 - Painel utilizado (em cima) e painel equivalente (em baixo) (Ventura, 2015)	43
Figura 5.4 - Momento estático de meia seção (Ventura, 2015).....	44
Figura 5.5 - Esquema de forças aplicadas nas juntas verticais	45
Figura 5.6 - Esquema de cálculo dos espaçamentos e larguras das cunhas entre juntas verticais	47

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 3.1 - Vista superior de um desviador	20
Fotografia 3.2 - Disposição dos desviadores na montagem laboratorial da aduela.....	21
Fotografia 4.1 - Painéis de CLT em sala climatizada antes de serem trabalhados.....	23
Fotografia 4.2 - Ensaio de tração em varão de aço M10	25
Fotografia 4.3 - Exemplo de entalhe para desviador de plataforma realizado	27
Fotografia 4.4 - Varão de aço colocado perpendicularmente ao plano do painel	30
Fotografia 4.5 - Distância da perfuração efetuada a partir do bordo do painel	30
Fotografia 4.6 - Varões de aço com extensómetros aplicados	31
Fotografia 4.7 - Extensómetros soldados a cabos.....	31
Fotografia 4.8 - a) Transporte dos painéis em laboratório; b) Elevação dos painéis para disposição hexagonal.....	32
Fotografia 4.9 - Sequência de montagem da aduela de torre eólica em CLT.....	33
Fotografia 4.10 - Continuação da sequência de montagem.....	34
Fotografia 4.11 - Aduela de torre eólica em CLT	34
Fotografia 5.1 - Desviador ao nível da plataforma aplicado	35
Fotografia 5.2 - Vista da junção da chapa de topo do desviador com a superfície da madeira	36
Fotografia 5.3 - Vista superior da ligação ao nível da plataforma de serviço	41

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Propriedades mecânicas do CLT (KLH, 2015).....	23
Quadro 4.2 - Características do painel de CLT.....	29
Quadro 4.3 - Resistência da madeira.....	29
Quadro 4.4 - Modo de rotura condicionante (h).....	29
Quadro 5.1 - Extensões, tensões e forças antes e depois do aperto dos desviadores por cabos	38
Quadro 5.2 - Pré-esforço aplicado após o primeiro ciclo.....	39
Quadro 5.3 - Pré-esforço aplicado após o segundo ciclo.....	39
Quadro 5.4 - Pré-esforço aplicado após o terceiro ciclo.....	39
Quadro 5.5 - Pré-esforço aplicado após o quarto ciclo.....	39
Quadro 5.6 - Pré-esforço após período de avaliação.....	40
Quadro 5.7 - Percentagens de perdas de pré-esforço.....	41
Quadro 5.8 - Larguras e espaçamentos entre cunhas para tensão de corte aplicada.....	48

SIMBOLOGIA

A_s - Área da secção resistente do parafuso

E - Módulo de elasticidade

$E_{0,mean}$ - Módulo de elasticidade paralelo as fibras

$E_{90,mean}$ - Módulo de elasticidade perpendicular as fibras

F - Força aplicada

$F_{v,Rk}$ - Capacidade resistente da ligação

$G_{0,mean}$ - Módulo de distorção paralelo às fibras

$G_{90,mean}$ - Módulo de distorção perpendicular às fibras

I - Segundo momento de área (vulgo momento de inércia) de uma secção

S - Momento estático de uma secção

d - Diâmetro nominal do parafuso

e - Espessura da secção

$f_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão perpendicular às fibras

$f_{c,0,k}$ - Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras

$f_{c,90,k}$ - Valor característico da resistência à compressão perpendicular às fibras

$f_{h,0,k}$ - Valor característico do esmagamento da madeira paralelo às fibras

$f_{h,90,k}$ - Valor característico do esmagamento da madeira perpendicular às fibras

$f_{m,k}$ - Valor característico da resistência à flexão

$f_{t,0,k}$ - Valor característico da resistência à tração paralela às fibras

$f_{t,90,k}$ - Valor característico da resistência à tração perpendicular às fibras

$f_{v,d}$ - Valor de calculo da resistência ao corte

$f_{v,k}$ - Valor característico da resistência ao corte

$f_{v,R,k}$ - Corte perpendicular às fibras

k_n - Fator de redução

k_{mod} - Fator de modificação para a duração de carga e conteúdo de humidade

γ_M - Coeficiente parcial de segurança do material

ε - Extensão do material

ρ_k - Valor característico da densidade da madeira

σ - Tensão do material

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

O aquecimento global, provocado pelo agravamento do efeito de estufa, é um dos grandes problemas que a humanidade enfrenta na atualidade. As alterações climáticas e a sustentabilidade são temas amplamente discutidos de modo a combater a desmesurada utilização de combustíveis fósseis. Na procura de soluções para esta problemática surgem alternativas como a energia hídrica, a geotérmica, a proveniente da biomassa e a das ondas e marés, notabilizando-se as energias solar e eólica como sendo as chamadas "mais limpas".

Sendo renovável e inesgotável a energia eólica surge na linha da frente perante as restantes soluções ecológicas devido ao fato de a sua produção, para além ser geralmente contínua ao longo do dia havendo variações de intensidades dependendo do local, ocupar a maioria das estações do ano, permitindo assim cumprir as metas estipuladas pelas associações governamentais ao nível das emissões de gases.

O betão e o aço, materiais geralmente utilizados na construção destas estruturas, envolvem elevados custos energéticos de produção o que, não sendo impeditivo da sua utilização para este fim, está em contradição com o objetivo essencial de recurso a fontes de energia limpas e "amigas do ambiente". A proposta de construção de torres eólicas em CLT (madeira lamelada colada cruzada) constitui um passo mais nesse sentido, sobretudo se conseguirem atingir níveis de eficácia estrutural e custo comparáveis com a das soluções concorrentes estabelecidas.

1.2 Objetivos

No sentido de uma análise quer técnica, quer económica do sistema proposto e comparativamente a outros tipos de torre e à solução implementada pelo único fabricante europeu conhecido de torres eólicas em CLT, esta dissertação tem como finalidade a produção laboratorial, em escala quase real, de uma aduela hexagonal de uma torre eólica em CLT e avaliar a viabilidade estrutural dos processos de ligação a utilizar neste tipo de torre em duas situações distintas:

- Nas ligações entre painéis ao nível das plataformas de trabalho entre pisos;
- Nas juntas verticais entre os mesmos painéis.

1.3 Estrutura da Dissertação

O primeiro capítulo faz uma breve introdução ao trabalho em estudo ao longo da dissertação, enquadrando o leitor na temática e apresentando os objetivos em foco.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica acerca das torres eólicas. Partindo da sua origem, foram dados a conhecer os tipos de aerogeradores utilizados na produção de energia eólica. De seguida foram apresentados os sistemas estruturais utilizados na construção de torres eólicas dando ênfase final, ao material utilizado na construção de torres em madeira e ao modelo utilizado pelo único fabricante conhecido deste tipo de torre.

No terceiro capítulo foi explicitado o sistema estrutural em estudo comparando-o com o existente. Foram apresentados procedimentos de montagem e vislumbrado o modo como as ligações perimetrais entre painéis irão funcionar.

O quarto capítulo foi dedicado ao trabalho experimental de construção da aduela em CLT com os procedimentos que antecederam a montagem, os materiais utilizados e o modo como a construção foi realizada.

No quinto capítulo foi realizado o estudo das ligações entre painéis, objeto de estudo da dissertação. Primeiro com as ligações perimetrais de pré-esforço ao nível das plataformas de serviço e seguidamente das ligações nas juntas verticais.

O último capítulo encerra este documento com as conclusões acerca do trabalho desenvolvido reforçando os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Origem das Torres Eólicas

Não é exatamente conhecida a origem do uso de energia eólica em proveito humano. Alguns autores corroboram a existência de vestígios de moinhos de pedra no Egito há cerca de 3000 anos. No entanto não existem provas indiscutíveis de que egípcios, gregos, fenícios ou romanos conhecessem na realidade torres eólicas (Hau, 2006).

A primeira informação confiável remonta ao ano de 644 d.C., reportando a existência de moinhos de vento na fronteira entre a Pérsia e o atual Afeganistão, utilizados na moagem de cereais, existindo ainda vestígios destas estruturas. Mais tarde o mesmo sistema foi utilizado na China, para a drenagem de campos de arroz. Se os chineses conheciam as torres eólicas antes dos persas ou se os moinhos europeus foram uma atualização do sistema chinês, tal, não é possível clarificar com toda a certeza (Hau, 2006). Na Holanda, a drenagem de águas através de moinhos de vento teve um grande impacto devido à necessidade de drenar grandes volumes de água para a obtenção de novos solos. Outra das utilizações iniciais da energia eólica era o transporte, mais propriamente nos barcos á vela (Hau, 2006).



Figura 2.1 - Moinho de vento de eixo vertical para moagem de cereais, Afeganistão (Hau,2006)

A partir do séc. XIX ocorreu o aparecimento das torres eólicas na Europa com Holanda e Alemanha entre os países com mais desenvolvimento a este nível, erigindo mais de 9000 e 20000 torres, respetivamente, em todo o continente. No final deste século, surge a primeira iniciativa de produção de energia nos Estados Unidos, no entanto foi na Dinamarca por Poul La Cour, professor num centro de educação de adultos em Askov, que se desenvolveu o método sistemático para a obtenção de energia com o recurso do vento (Hau, 2006).

Atualmente a potência instalada de produção de energia eólica na Europa é de cerca de 128.8 gigawatts (GW), o que contribui com cerca de 10 % da energia consumida num ano tido como normal. Está previsto que até 2030 a energia eólica possa cobrir um quarto da procura energética no continente passando para 320 GW instalados (EWEA, 2015). Desta potência pressupõe-se que 254 GW advirão de vento *onshore* e 66 GW de energia eólica *offshore*, prevendo-se um crescimento de cerca de 300 mil empregos diretos e indiretos até essa data.

2.2 Aerogeradores

Desde a sua origem, foram várias as tipologias de aerogeradores concebidos e desenvolvidos por todo o mundo, sendo que estes podem ser classificados consoante a posição do eixo do rotor: vertical ou horizontal (Mathew, 2006). Os aerogeradores de eixo vertical (VAWT - *Vertical Axis Wind Turbine*) possuem o seu eixo de rotação perpendicular à direção do atuante do vento. Assim, estes podem receber vento de qualquer direção sem que para isso necessitem de equipamentos de direcionamento. Uma grande desvantagem deste sistema é a incapacidade de auto arranque necessitando de mecanismos adicionais para tal. Outra grande desvantagem é a possibilidade de ao longo da rotação, as pás trespassarem zonas aerodinamicamente mortas, reduzindo a eficácia do sistema (Mathew, 2006).

Os aerogeradores de eixo horizontal (HAWT - *Horizontal Axis Wind Turbine*), sendo os mais usados nos dias correntes, têm o eixo de rotação paralelo ao fluxo do vento e dispõem de um sensor de direção, cuja função é determinar a direção do vento para que ocorra giração das pás obtendo um maior rendimento da energia gerada. Possuidor de uma velocidade de arranque baixa e fácil rotação, este sistema apresenta em geral um coeficiente de potência bastante elevado. Contudo, neste sistema, a caixa de velocidades e o gerador são colocados sobre a torre, ao contrário do que acontece no VAWT, o que influencia a conceção da própria torre, tornando-se mais complexa e dispendiosa. Dentro dos aerogeradores de eixo vertical e dependendo do número de pás, estas ainda podem ser classificadas como *single bladed*, *two bladed*, *three bladed* ou *multi bladed* (Mathew, 2006).

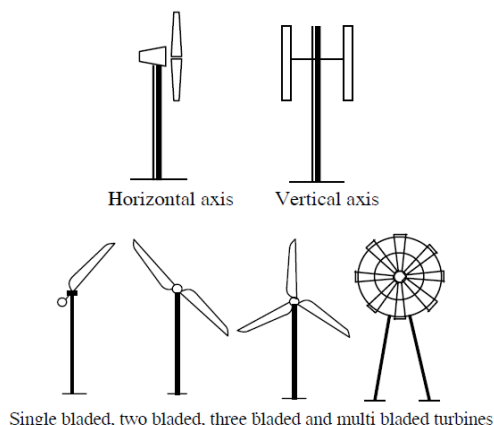


Figura 2.2 - Tipos de aerogeradores (Mathew, 2006)

O equipamento responsável para a geração de energia pode dividir-se entre o rotor, *Nacelle* e torre. As pás do rotor capturam a energia do vento e convertem-na em energia rotacional, sendo esta transferida para o gerador através do eixo. A *Nacelle* é a cabine que abriga a caixa de velocidades e o gerador. A caixa de velocidades aumenta a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador, enquanto este usa a energia rotacional proveniente do eixo para gerar energia elétrica através de eletromagnetismo. Existem ainda outros sensores importantes como o controlador, aparelho necessário para o alinhamento do rotor com a direção do vento; a unidade de controlo elétrico, que desliga o sistema em caso de mau funcionamento e controla os sistemas de orientação; os travões, que detêm a rotação do eixo em caso de falha do sistema ou sobrecarga de energia; e ainda o anemómetro, sensor de medição da velocidade do vento (Ventura, 2015).

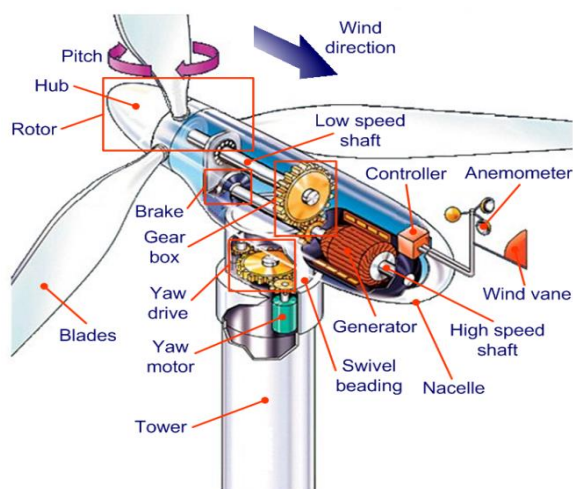


Figura 2.3 - Componentes de um aerogerador (Molina e Alvarez, 2011)

2.3 Tipos de Torres

2.3.1 Torres em aço soldado

Nos dias que correm, as torres em aço soldadas dominam o mercado dos produtores de energia eólica. O sistema é composto por sobreposição de anéis cilíndricos, formados por chapas de aço curvadas circularmente e conectadas através de soldadura nas juntas verticais e horizontais. Depois de formados os anéis cilíndricos, estes são sobrepostos formando a torre, sendo que a ligação entre si é realizada através de flanges aparafusadas. A flange inferior está aparafusada à fundação e a superior à *Nacelle* (Engström *et al.*, 2010).

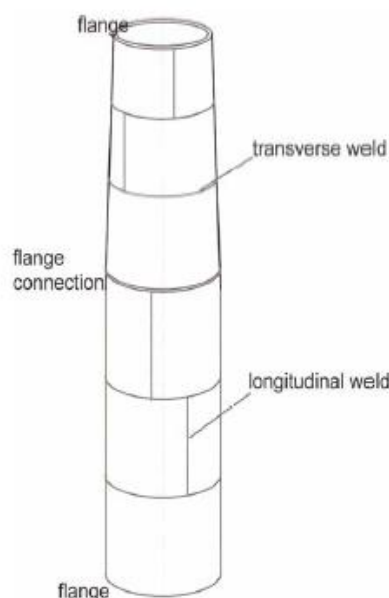


Figura 2.4 - Duas seções de uma torre em aço soldado (Engström *et al.*, 2010)

Neste sistema, a torre é essencialmente dimensionada à tração e encurvadura para os estados limites de carga. Preferencialmente, ambas as condições deveriam ser satisfeitas para níveis de carga similares mas, aquando de alteração nos diâmetros dos cilindros e nas espessuras das chapas, tal pode não acontecer, pois o aumento do diâmetro com uma correspondente redução da espessura da chapa, aumenta a resistência à tração mas diminui a resistência á encurvadura. Finalmente a torre terá que ser verificada à resistência à fadiga (Engström *et al.*, 2010).

As soldaduras de ligação, quer transversais quer as longitudinais, e as alterações de dimensões nas flanges afetarão negativamente a força aplicada. Desse modo são as soldaduras e a

geometria das flanges que condicionarão a determinação da resistência à fadiga e não a classe do aço (Engström *et al.*, 2010).

No dimensionamento, a torre é afetada pela pressão exercida pelo rotor. O impulso criará um momento fletor atuante que aumenta com a distância ao eixo da turbina sendo inversamente proporcional à altura acima da base. De modo a contornar o crescente momento fletor é favorável a geometria da torre em formato cônico, até ao limite de deformação (Engström *et al.*, 2010).

No entanto, esta tipologia de torre tem diversas restrições a nível de transporte. Na Suécia, o transporte terrestre apenas é possível para diâmetros menores que 4.5 metros, mesmo sendo realizado com autorizações especiais. Noutros países ou se o percurso se fizer por estradas que não comportem esta dimensão, estas restrições poderão ser ainda mais severas (até 3.5 metros). Até certa medida, estes valores podem ser contornados com o aumento da espessura da chapa, tornando-se no entanto menos económico (Engström *et al.*, 2010).

2.3.2 Torres em aço aparafusado

As torres em aço soldado referidas anteriormente, podem requerer uma restrição relativamente ao diâmetro da sua base, mas esta restrição, tem um efeito prejudicial sobre o peso da estrutura e consequentemente sobre o seu custo quando estão em causa torres com 100 ou mais metros de altura. Assim sendo, uma maneira de contornar esta situação é evitar a soldadura em fábrica juntando as placas de aço da torre através de parafusos e porcas, formando juntas de fricção, podendo estas serem realizadas em obra. A execução feita deste modo reduzirá igualmente o efeito negativo sobre a resistência à fadiga provocada pelas soldaduras (Engström *et al.*, 2010).

Uma desvantagem deste sistema de ligações aparafusadas é o acesso ao exterior da parede da torre. Uma solução é colocar antecipadamente os parafusos com as porcas na secção superior e preparar a secção inferior com as fendas necessárias (Engström *et al.*, 2010). O esquema é perceptível na figura seguinte.

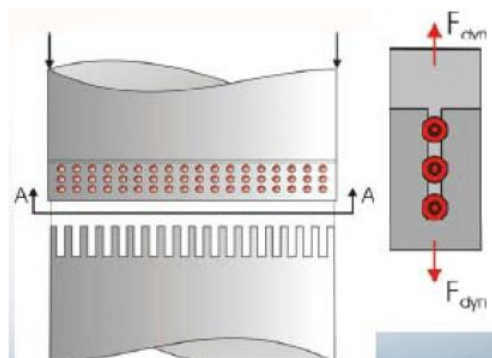


Figura 2.5 - Torre em aço aparafusado
(Engström *et al.*, 2010)

2.3.3 Torres em betão armado

Numa torre de betão armado, o betão apenas tem a capacidade para resistir à compressão. A resistência à tração é providenciada por cabos de pré-esforço que se dispõem em tubos no interior das paredes de betão ou então, no interior ou exterior das paredes facilitando a inspeção das mesmas. Para aumento da resistência à compressão são ainda utilizadas armaduras nas paredes. Este tipo de torre é dimensionado para o caso de carga extremo, uma vez que tem uma larga margem no que respeita à segurança à fadiga (Engström *et al.*, 2010).

Ao aumentar a espessura do revestimento do betão pode ocorrer um aumento de vida útil da torre para aproximadamente 50 anos. Este sistema estrutural pode então servir para duas gerações de aerogeradores obtendo poupanças económicas. Comparativamente com as torres em aço as torres em betão armado são bastante mais pesadas e o seu tempo de construção é mais moroso. Por outro lado, os elementos construtivos são de pequenas dimensões, não ocorrendo problemas de restrições a nível de transporte (Engström *et al.*, 2010).

2.3.4 Torres híbridas de aço e betão

A ideia fulcral na execução de torres híbridas aço-betão é a utilização de betão na parte inferior da torre, onde os diâmetros são maiores, e aço na parte superior onde as secções soldadas das chapas de aço não entrem em conflito com as restrições impostas a nível de transporte. A conceção da secção de betão armado torna-se mais simples, bem como a segurança estrutural em termos de frequências próprias (Engström *et al.*, 2010). Com este método conseguir-se-ão torres com alturas superiores às elaboradas apenas em aço, e com construção bastante mais rápida e com peso inferior às das suas semelhantes em betão armado.



Figura 2.6 - Torre híbrida em
aço e betão (Engström *et al.*,
2010)

2.3.5 Torres treliçadas

As torres treliçadas foram utilizadas em grande escala em aerogeradores de pequenas dimensões, essencialmente em países não europeus. Para aerogeradores maiores, é utilizada esta tipologia quando existe necessidade de uma torre rígida. Esta tipologia não deforma como as torres tubulares em aço devido as treliças que compõem a estrutura (Engström *et al.*, 2010).

As grandes vantagens deste sistema estrutural utilizado há mais de um século são: o baixo peso e custo, a utilização de perfis padrão galvanizados a quente, a transparência visual, a facilidade de transporte e montagem e a menor exigência em termos de desmontagem e desmantelamento. Por outro lado, as desvantagens centram-se no elevado número de parafusos utilizados expostos à intempérie e à necessidade de verificação periódica destes, e também aos problemas de propriedade dinâmica e de rigidez torsional. A possibilidade de ocorrência de um impacto na torre nas características dinâmicas pode ter consequências gravíssimas, pondo em perigo o aerogerador num caso extremo. Outro perigo é o risco de formação de gelo devido ao fato da torre ser aberta (Engström *et al.*, 2010).



Figura 2.7 - Torre treliçada
(Engström *et al.*, 2010)

2.4 Torres Eólicas em Madeira

2.4.1 CLT - Cross-Laminated Timber

O material utilizado na construção de torres eólicas em madeira é o Cross-Laminated Timber (CLT), em português Madeira Lamelada Colada Cruzada. Este inovador produto desenvolvido na Áustria e Alemanha ganhou popularidade em diversas aplicações por toda a Europa, existindo de momento diversos fabricantes por todo o continente. A sua utilização em edifícios e em outros tipos de construções estruturais, um pouco por todo o mundo, permite testemunhar as vantagens que este produto pode oferecer ao setor da construção. A facilidade de manuseamento, o alto nível de pré-fabricação, o bom isolamento térmico e acústico e a boa performance em condições de incêndio, são benefícios que derivam da solidez da construção em madeira (FPInnovations, 2011).

Os painéis de CLT consistem em diversas camadas coladas entre si sob pressão, tipicamente a 90°, de tabuas de madeira (lamelas) posicionadas ao lado e para baixo. Um elemento de CLT tem pelo menos três camadas de lamelas coladas ortogonalmente, alternando a orientação com as lamelas vizinhas. Em configurações especiais podem ser coladas lamelas consecutivas na mesma direção formando uma lamela dupla de modo a obter condições estruturais específicas (FPInnovations, 2011).

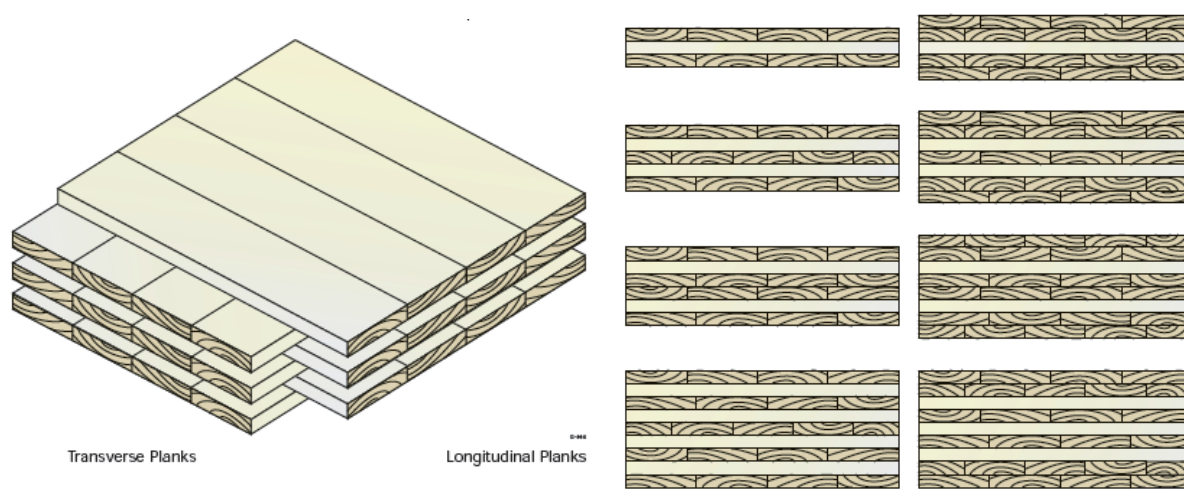


Figura 2.8 - Madeira lamelada colada cruzada (FPInnovations, 2011)

Estas orientações garantem boas características de rigidez e resistência, dentro e fora do plano, assemelhando-se ao que acontece no contraplacado. As lamelas exteriores dos painéis em caso de utilização como paredes, são normalmente orientadas paralelamente às cargas verticais. No caso de utilização em coberturas ou pisos, as camadas exteriores são paralelas à direção principal de extensão (FPInnovations, 2011). Posto isto, estes painéis são adequados para aplicações como lajes, paredes ou diafragmas e, como nova implementação (2012), em torres eólicas.

2.4.2 Torres em CLT

Este inovador sistema estrutural foi desenvolvido e impulsionado pela empresa alemã TimberTower, sendo até ao momento, tanto quanto é do conhecimento do autor, o único fabricante conhecido de torres eólicas com este material. Dispondo de dois modelos de torre até ao momento, uma com 100 e outra com 140 metros de altura (até ao eixo do rotor), a TimberTower vangloria-se por ter criado uma solução estrutural económica, duradoura e amiga do ambiente (TimberTower, 2015).

Composta por painéis de CLT com comprimentos que variam entre 3.75 e 15 metros e com larguras variantes entre 1.18 e 2.90 metros, este tipo de material confere à torre uma comprovada resistência à fadiga e à encurvadura devido à sua elevada resistência à compressão na direção do fio da madeira e à esbelteza das seções componentes, ações de elevada relevância no dimensionamento de torres eólicas. Apesar do peso volúmico do material ser relativamente

baixo, esta solução torna-se um pouco mais pesada comparativamente as torres em aço, mas destaca-se em relação às estruturas em betão ou mistas tornando-se bastante mais leve (Engström et al, 2010).

O seu método construtivo baseia-se na pré-fabricação de uma estrutura treliçada, que servirá de apoio à montagem dos painéis de CLT. Nenhum destes compostos, quer a estrutura interior quer os painéis, requerem algum tipo de transporte especial para o local da obra. Esta estrutura dispendo de uma escada de acesso, servirá igualmente como zona de trabalho, manutenção futura e zona de equipamentos. Depois da fundação em betão armado ser efetuada, e dispendo de uma grua de grandes dimensões, o primeiro troço de ligação construtivo é montado na base, sendo os restantes colocados progressivamente de acordo com o plano de trabalhos, em unísono com a colocação dos painéis. Cada painel tem uma temporização própria para a acoplação à estrutura central sendo uma sequência aproximadamente helicoidal. A estrutura construtiva em termos de desempenho final poder-se-á considerar como sendo não-estrutural.

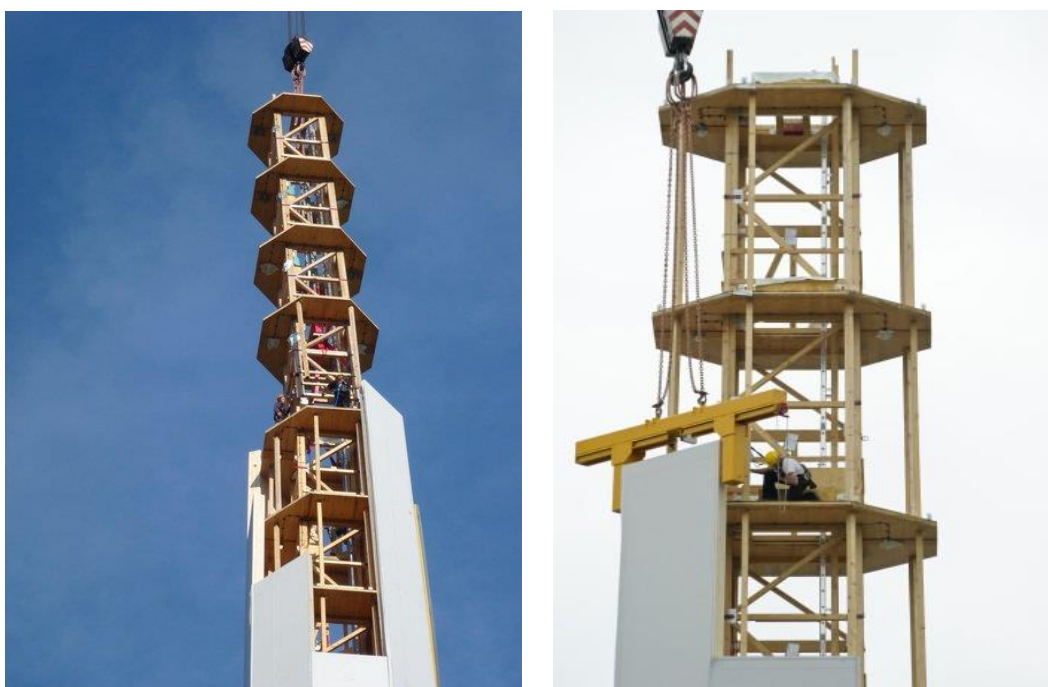


Figura 2.9 - Construção da torre
(TimberTower, 2015)

A ligação entre painéis e a fundação é efetuada através de chapas de aço tornando a estrutura monolítica, sendo que a conexão à *nacelle* requer um adaptador em aço com parafusos pré-esforçados. Os painéis e respetivas juntas são envolvidos por membranas plásticas de proteção contra a intempérie (TimberTower, 2015).

Com um ciclo de vida de 40 anos (TimberTower, 2015), uma das grandes vantagens deste sistema estrutural reside na economia de custos associada ao transporte dos painéis, pois estes não necessitam de qualquer transporte especial para o efeito. Outra vantagem é a fatura energética do processamento do CLT pois este requer muito menos energia do que a fabricação de outros materiais como o aço ou o betão. Embora neste trabalho não se enverede pela análise de ciclo de vida (LCA) do material, estudos com estruturas de natureza comparável demonstram uma clara supremacia de soluções baseadas em madeira em relação às dos materiais convencionais. Outra vantagem, de natureza sociológica, centra-se na maior aceitação, por parte das comunidades locais, das torres produzidas com este material, visto que a madeira é um produto natural.



Figura 2.10 - Torre eólica em CLT
(Windpowerengineering, 2015)

Atualmente a empresa continua a desenvolver novos produtos, sendo um deles uma fundação em madeira, alternativa às tradicionais em betão armado. Direcionada para as torres em CLT, esta fundação em forma de cone, funcionará como um só corpo com a torre. A base do cone da fundação terá 20 metros de diâmetro e a sua altura será de cerca de 7 metros (TimberTower,2015).

3 SISTEMA ESTRUTURAL

3.1 Modelo Construtivo Proposto

Neste capítulo apresenta-se uma proposta de sistema construtivo para torres eólicas em madeira que, considerada a racionalidade de processos e o montante de recursos que envolve, se crê constituir uma alternativa competitiva aos sistemas atualmente existentes. Como já foi referido anteriormente (Capítulo 2 - 2.4 - 2.4.2), as torres eólicas realizadas com painéis de CLT constituem um compromisso entre as exigências de sustentabilidade e de desempenho estrutural, os quais são de primeira linha dado a importância de uma obra desta natureza.

O modelo construtivo estudado nesta dissertação tem como base principal o modo como as ligações entre os painéis de CLT são efetuadas. Ao contrário do sistema utilizado pelo único comercializador existente deste tipo de torre, este não necessita de nenhuma estrutura interior pré-instalada para acoplar os painéis que formarão a torre. Esta junção será feita através de dois sistemas de ligação, explicitados mais à frente neste documento, que garantirão a segurança e a solidarização estrutural da torre tornando-a monolítica.

O processo construtivo deste sistema também se afigura bastante mais eficiente do que o existente. Havendo algumas limitações à divulgação de informação por questões de proteção de propriedade intelectual, pode avançar-se que neste modelo a grua elevatória que içará os painéis de CLT ficará no centro da estrutura. Esta, de seção transversal octogonal (Ventura, 2015), será executada de forma semelhante ao processo elaborado pela TimberTower, com a diferença de que a montagem consistirá no posicionamento alternado de 4 painéis a cada nível e não helicoidalmente sendo os painéis dispostos a níveis diferentes devido ao fato de os ligadores terem de ser introduzidos aquando da colocação dos painéis. Para além da necessidade da introdução dos ligadores como foi referido, este método provocará o melhoramento das secções horizontais através da repartição das juntas existentes entre os painéis por toda a superfície da torre. Quanto às dimensões dos painéis pressupõe-se que estes terão comprimentos, larguras e espessuras variáveis de acordo com a altitude da torre, tal como é já utilizado nos modelos da empresa alemã, de modo a formar um tronco piramidal octogonal.

Como vantagens deste processo, podem referir-se: *i)* a não utilização de uma estrutura interior para a inserção dos painéis de CLT, com a correspondente poupança em custos e tempo de

construção; *ii*) a utilização de um sistema de elevação interior permitindo que a construção prossiga mesmo em condições meteorologicamente adversas; *iii*) o sistema de elevação ser leveiro e desmontável, dispensando veículos especiais para o seu transporte para o local da obra; *iv*) os painéis serem dispostos quatro a quatro por cada nível construtivo, resultando, num menor número de painéis diferentes em termos de dimensões ao contrário da construção helicoidal, o que conduz a menores custos de fabricação. Deve referir-se, no entanto, que será sempre necessária uma grua exterior de grandes dimensões para a elevação e colocação do suporte de aço necessário para a *nacelle*, da própria *nacelle* e do rotor, pelo que o sistema proposto só será competitivo na construção de parques eólicos com um número de torres significativo, no qual o custo de aluguer desta grua pode ser diluído pelo número de torres e o tempo de utilização minimizado pela montagem consecutiva e continua das *nacelles* no final do processo de construção.

Os dados relativos a este modelo ainda são escassos devido a um pedido de patente em curso para este sistema de ligadores e montagem da estrutura, apenas sendo estudado ao pormenor neste documento as ligações ao nível das plataformas e das juntas verticais. Ainda assim tentou-se ao máximo vislumbrar um pouco deste inovador processo sem nunca ferir a propriedade intelectual dos autores do projeto. Apresentam-se de seguida algumas imagens cedidas por um dos projetistas de modo a antever a sequência de montagem da torre.

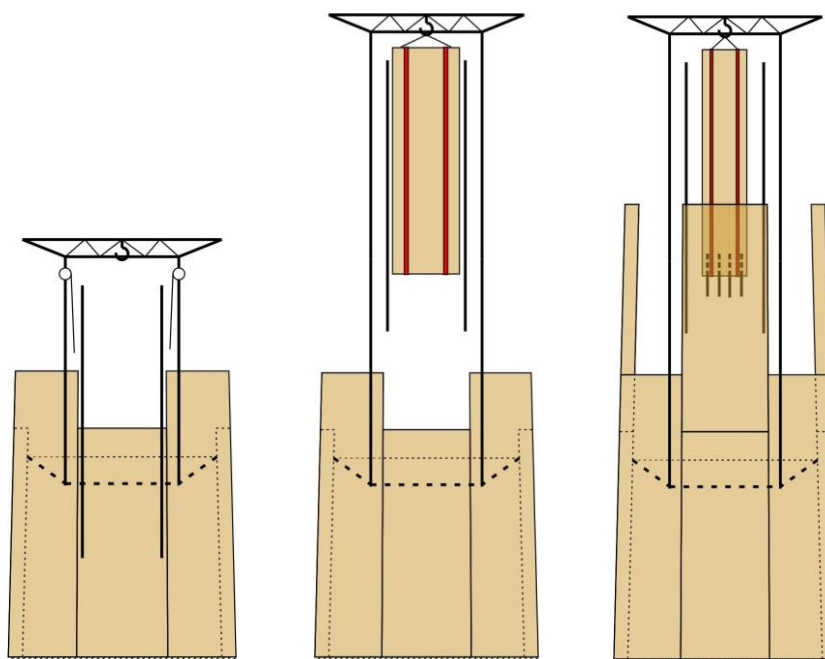


Figura 3.1 - Sequência de montagem de torre eólica em CLT
(imagem cedida pelo Professor João Negrão)

3.2.2 Ligação perimetral por varões pré-esforçados

O segundo modelo de ligações proposto para este sistema será o cerne da uniformização dos painéis de modo a solidarizar poligonalmente a estrutura. Esta ligação é composta por desviadores de forças semelhantes aos utilizados na ligação por cabos, sendo que estes serão ligados entre si por varões roscados. O número de varões coincidirá uma vez mais com o número de painéis que formarão a secção transversal. Através do aperto dos varões roscados será aplicado um pré-esforço de tração, transmitido pelos desviadores aos painéis de CLT, assim conduzindo a compressão entre estes, levando à sua junção.

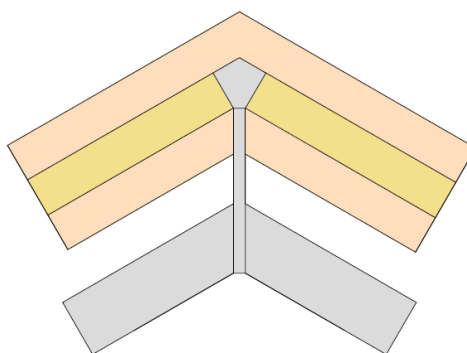


Figura 3.3 - Ancoragem do desviador ao nível das plataformas de serviço

Ao ser aplicado o pré-esforço nos varões a estrutura tornar-se-á monolítica formando uma só peça. Este aperto nos varões terá de ser executado de acordo com uma sequência de aperto, a fim de assegurar a simetria central das forças em todo o perímetro e evitar a distorção da secção transversal. A sequência de aperto a ser utilizada foi uma das questões estudadas nesta dissertação aquando do estudo das ligações (Capítulo 5).

Outra importante funcionalidade destes varões será a sua utilização como suportes de plataformas metálicas a serem introduzidas após um aperto inicial, as quais funcionarão como diafragmas rígidos, impedindo a distorção da secção poligonal e contribuindo para a uniformização dos deslocamentos horizontais distribuindo estas forças por toda a secção. Para além da importância a nível estrutural, estas plataformas serão de grande utilidade em fase de exploração. Funcionando a vários níveis ao longo da torre, servirão como plataformas de serviço quer na fase de montagem, servindo de apoio à treliça utilizada para elevação dos painéis de CLT, quer ao longo da sua vida útil para monitorização e manutenção da estrutura. A zona de equipamentos necessários para o funcionamento da torre eólica será igualmente

apoiada nestas plataformas, sendo estas ligadas entre si através de uma escadaria metálica central.

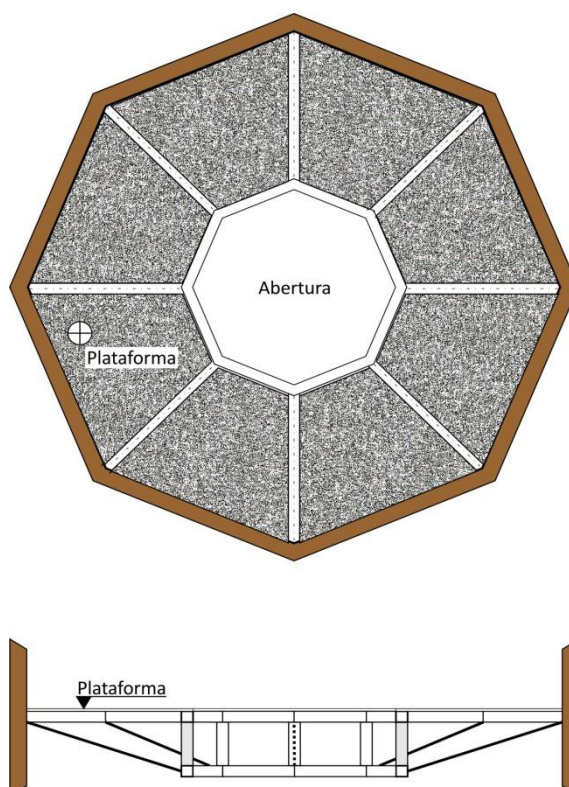


Figura 3.4 - Esquema estrutural da plataforma de serviço (imagem cedida pelo Professor João Negrão)

Estas plataformas de serviço serão conectadas à ligação através de braçadeiras metálicas. No caso estudado e executado na montagem laboratorial, os painéis de CLT utilizados foram apenas compostos por três lamelas mas o sistema da ligações proposto pode atuar com espessuras mais elevadas, requerendo um aumento nas forças de pré-esforço a aplicar devido ao aumento da área lateral de contacto entre painéis e, conseqüentemente, da força normal necessária nesse interface, de modo a garantir uma resistência mínima por atrito ao escorregamento inter-painéis. Como exemplo na figura seguinte, num painel com 5 lamelas os desviadores exerceriam forças distribuídas nas duas lamelas de fio horizontal, obtendo à mesma compressão entre eles.

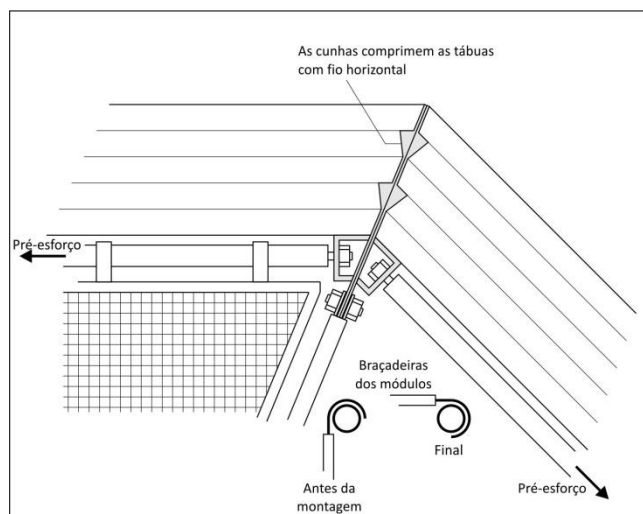


Figura 3.5 - Pormenor de ligação entre varões roscados de aço e plataformas de serviço (imagem cedida pelo Professor João Negrão)

Para a construção laboratorial da aduela de torre eólica em CLT foram utilizados desviadores com forma ligeiramente diferente dos propostos para este sistema estrutural. Isto deveu-se ao fato dos desviadores em aço serem produzidos como protótipos na oficina do Departamento de Engenharia Civil não sendo possível atingir-se o rigor dimensional das peças que poderia obter-se com a sua produção industrial com moldes, e também antevendo um menor esforço na execução dos entalhes nos painéis onde os desviadores deverão encaixar. Deste modo optou-se por uma solução em T (Figura 3.6) ao invés do losango proposto (Figura 3.3), porque esta configuração permitiu evitar a abertura dos entalhes internos para acomodação dos losangos em aço. Esta solução introduz uma significativa compressão perpendicular ao fio, pelo que só é possível quando, como é o caso, as forças de desvio são pequenas. Excluindo este aspeto, esta configuração funcionará essencialmente da mesma forma que a de losangos, pré-esforçando os varões de aço criando tração da peça e deste modo comprimindo os painéis levando à sua junção.

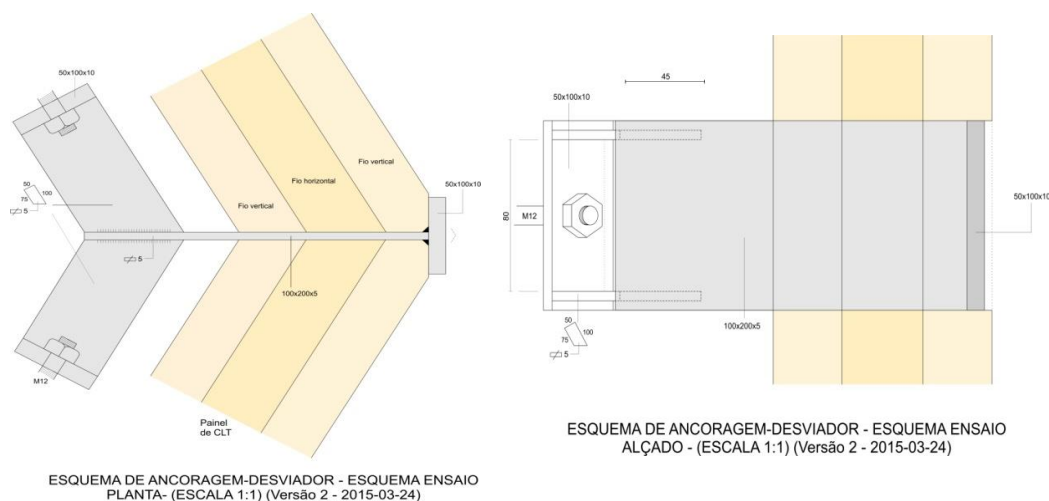


Figura 3.6 - Esquema de ancoragem (imagem cedida pelo Professor João Negrão)

Os desviadores usados no trabalho laboratorial deveriam ser todos iguais e compostos por chapas de aço soldadas com dimensões variáveis entre 5 e 10 milímetros como figura nas imagens acima dispostas, mas devido à não existência de chapas de 5 milímetros para entrega, e a um lapso na sua produção, como simplificação utilizaram-se apenas chapas de 10 milímetros, tendo sido fabricados dois tipos de desviadores com diferentes dimensões na zona de aperto dos parafusos. Ao nível do funcionamento do sistema de ligações este fator não será relevante, visto que não afeta a geometria das zonas de contato entre a peça e os painéis, que determinam as forças de pré-esforço por simples equilíbrio estático. De modo a manter a equidade do sistema colocaram-se os desviadores alternadamente nos vértices da secção transversal a ser erigida em laboratório.



Fotografia 3.1 - Vista superior de um desviador



Fotografia 3.2 - Disposição dos desviadores na
montagem laboratorial da aduela

4 CONSTRUÇÃO LABORATORIAL DE ADUELA

4.1 Materiais

Esta dissertação centra-se sobretudo na avaliação experimental das ligações do sistema proposto para torres eólicas em CLT. Deste modo foi construída no Laboratório de Estruturas, Mecânica Estrutural e Construções do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra uma aduela de torre com os dois sistemas de ligadores. O diâmetro do polígono e as espessuras dos painéis poderiam corresponder a uma secção de topo de uma torre real pois, como já foi referido anteriormente as espessuras estruturais necessárias para garantir a sua integridade vão diminuindo com a altitude.

Um dos pontos essenciais da elaboração do trabalho experimental é a preparação dos painéis de CLT. A aduela a ser construída será composta por seis painéis de três lamelas, duas verticais e uma horizontal, fabricados em bisel com ângulos de 30° de modo a formar uma secção transversal hexagonal. Numa construção real como já foi mencionado a estrutura transversal da torre será octogonal mas, como o objetivo do ensaio se centra na avaliação do comportamento das ligações e particularmente dos desviadores, por questões económicas optou-se por esta solução levando a um menor número de ligadores e a uma melhor gestão de espaço no laboratório. As dimensões dos painéis são de 1.20 metros de largura na parte exterior e 1.10 metros na parte interior, com 2.60 metros de comprimento e 0.10 metros de espessura. Após a receção, estes painéis foram depositados numa sala climatizada, com temperatura (20°C) e humidade relativa controlada (65%) de modo a preservar as características do material intactas ai se tendo mantido por um período de vários meses.



Fotografia 4.1 - Painéis de CLT em sala climatizada antes de serem trabalhados

Estes painéis foram fornecidos pela empresa KLH com sede na Áustria. No fabrico dos painéis é utilizada madeira de Pinho, Abeto e Pinheiro Manso com um teor em água de aproximadamente 12%, colando-se as lamelas transversalmente por prensagem com uma força de 6 N/mm^2 . Os painéis são adequados para classes de serviço 1 e 2 de acordo com o EN 1995-1-1. Esta empresa produz peças com dimensões máximas de 16.50 metros de comprimento, 2.95 de largura e 0.50 metros de espessura, sendo a sua massa volúmica de 510 Kg/m^3 . Algumas características mecânicas importantes dos painéis de CLT são apresentadas no quadro seguinte (KLH, 2015).

Quadro 4.1 - Propriedades mecânicas do CLT (KLH, 2015)

	Resistências características para ações perpendiculares à extensão do painel			Resistências características para ações no plano do painel			
Módulo de Elasticidade	Paralelo fio	$E_{0,mean}$	12000	Paralelo fio	$E_{0,mean}$	12000	MPa
	Perpendicular fio	$E_{90,mean}$	370				
Módulo de Distorção	Paralelo fio	$G_{0,mean}$	690	Paralelo fio	$G_{0,mean}$	250	MPa
	Perpendicular fio	$G_{90,mean}$	50				
Flexão	Paralelo fio	$f_{m,k}$	24	Paralelo fio	$f_{m,k}$	23	MPa
Tração	Perpendicular fio	$f_{t,90,k}$	0,12	Paralelo fio	$f_{t,0,k}$	16,5	MPa
Compressão	Perpendicular fio	$f_{c,90,k}$	2,7	Perpendicular fio	$f_{c,90,k}$	24	MPa
				Paralelo fio	$f_{c,0,k}$	30	
Corte	Paralelo fio	$f_{v,k}$	2,7	Paralelo fio	$f_{v,k}$	5,2	MPa
	Perpendicular fio	$f_{v,R,k}$	1,5				

Outro dos componentes chaves da construção da aduela serão os desviadores em aço. Como já foi referido anteriormente estes desviadores foram fabricados na oficina do Departamento de Engenharia Civil e como simplificação quer da sua própria elaboração, quer dos entalhes a realizar nos painéis de CLT, estes terão a forma de T ao invés do projetado para uma torre real futura. Conforme foi também já referenciado estes desviadores terão dimensões diferentes na zona de aperto dos parafusos sendo por isso colocados alternadamente segundo o perímetro, de modo a minimizar a assimetria e os seus eventuais efeitos, embora não seja previsível qualquer efeito significativo decorrente das pequenas diferenças geométricas patentes nos dois tipos representados na Figura 4.1.

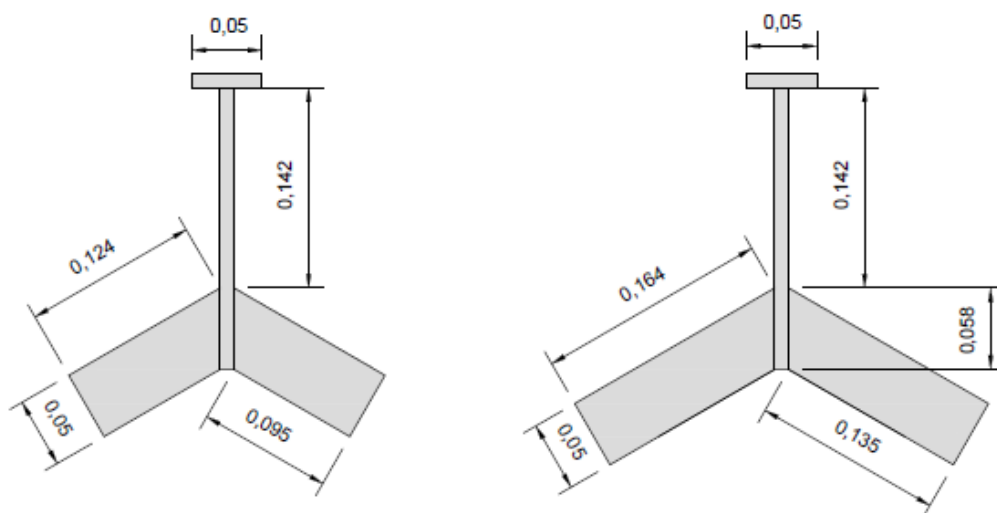


Figura 4.1 - Dimensões dos desviadores ao nível das plataformas de serviço em metros

O acoplamento dos painéis foi feito com varões roscados em aço e porcas para efetuar o aperto necessário. Os varões escolhidos foram M10 segundo a EN 20898-1, tendo sido cortados em laboratório de modo a atingir-se o comprimento de 90 centímetros medida necessária para conectar os dois desviadores colocados em cada painel.

Após a montagem da torre a medição das extensões provocadas pelo aperto dos varões foi feita com extensómetros de resistência elétrica colados a meio vão dos varões. Estes serão de 120Ω do tipo FLK-6-11 da marca "Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd". Foram colados seis extensómetros nos varões e onze nos desviadores por cabos (objeto de estudo de dissertação paralela a esta), tendo a leitura e registo sido feita com um Data Logger TDS-602 de trinta canais.

4.1.1 Ensaio de tração nos varões de aço

Os varões de aço foram adquiridos numa superfície comercial de materiais de construção pelo que não foram fornecidos dados das suas características mecânicas. Deste modo foi realizado em laboratório um ensaio de tração de um varão com vista a conhecer melhor as especificidades do material utilizado nas ligações, embora o nível de força e tensão que se pretende aplicar nos ensaios exploratórios deste trabalho seja muito baixo e compatível com a classe de aço de mais baixo desempenho. A partir de uma amostra com 30 centímetros de comprimento e sabendo de antemão que o Módulo de Elasticidade do aço é 210 GPa, foi registado o valor necessário de força de tração aplicada para levar o provete à rotura. O valor de rotura foi de 32.71 KN (aproximadamente 3338 Kg). Sendo a secção do fundo da rosca de 58 mm², corresponde a esta força uma tensão de rotura de cerca de 560 MPa, o que coloca o aço na classe 5.6 ou 5.8.



Fotografia 4.2 - Ensaio de tração em varão de aço M10

4.2 Preparação Experimental

Antes de ser possível dar início à construção laboratorial da aduela de torre eólica foram necessárias diversas manobras e tarefas que tecnicamente não terão grande importância, mas que do ponto de vista experimental e construtivo foram essenciais para a realização do trabalho. A primeira intervenção a ser realizada foi a da abertura dos entalhes nos painéis de CLT para possibilitar o encaixe dos desviadores em aço das ligações. Os entalhes foram feitos nas laterais dos painéis com o auxílio de formões, martelo e serrote, em posições iguais no que se refere à ligação inferior. Quanto à ligação superior teve de ocorrer uma ligeira alteração na altura do entalhe, como será visto mais à frente, devido à dimensão do alçado de um dos desviadores por cabo ser diferente dos restantes.

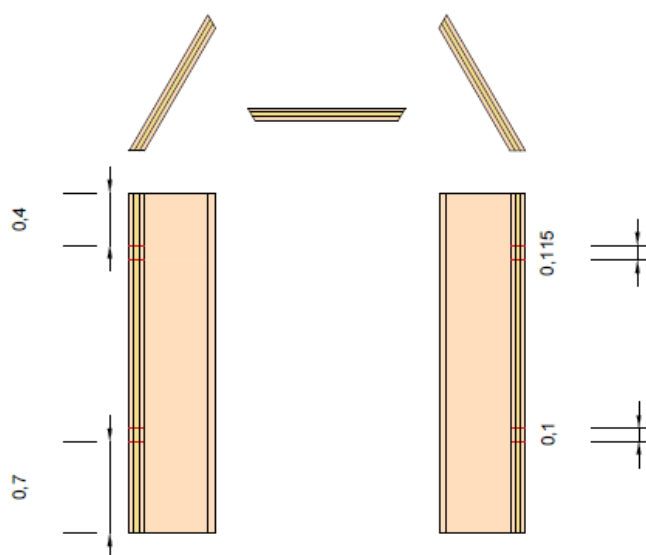


Figura 4.2 - Alturas dos entalhes a realizar nos painéis de CLT em metros

Os entalhes na ligação inferior foram todos realizados de igual modo. Como já se referiu, substituíram-se as ancoragens previstas da Figura 3.3 pelas representadas na Figura 3.6, a fim de evitar a difícil tarefa de abertura de "slots" na camada central de madeira. Desta forma, os rasgos na madeira reduziram-se a chanfros nos vértices extremos das juntas de painéis, com as dimensões indicadas na Figura 4.3. Notaram-se contudo pequenas desigualdades sobretudo devido aos cordões de soldadura, solucionando a situação com a marcação das peças em função dos painéis em que iriam encaixar moldando-os individualmente. É de referir que esta solução apenas pôde ser aplicada porque, tendo em conta o carácter exploratório deste estudo, as forças de pré-esforço a aplicar foram muito inferiores ao que seriam em condições de construção real. Nesse caso, o esmagamento da camada extrema por compressão perpendicular ao fio obrigaria

à consideração de chapas de ancoragem de grande dimensão, que colocariam vários problemas de aplicação prática.

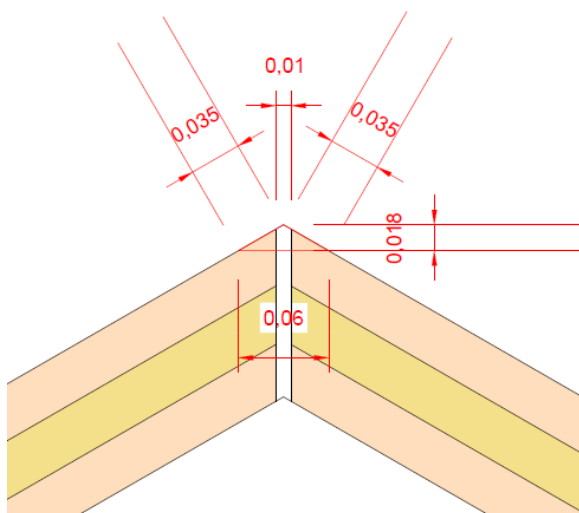


Figura 4.3 - Dimensões dos entalhes a realizar



Fotografia 4.3 - Exemplo de entalhe para desviador de plataforma realizado

Quanto aos entalhes realizados para a ligação superior estes foram de maior dificuldade em termos de execução comparativamente com os anteriores. Isto deveu-se ao fato dos desviadores terem sido produzidos no seu formato original (em losango), tornando-se de difícil fabrico na oficina do departamento o que gerou disparidades entre as peças. Foi necessário portanto proceder à medição de cada uma delas e como tinha já sido regra para as ligações inferiores,

numerar as peças e painéis de modo a que quando se efetuasse a montagem da adula todas elas encaixassem na perfeição.

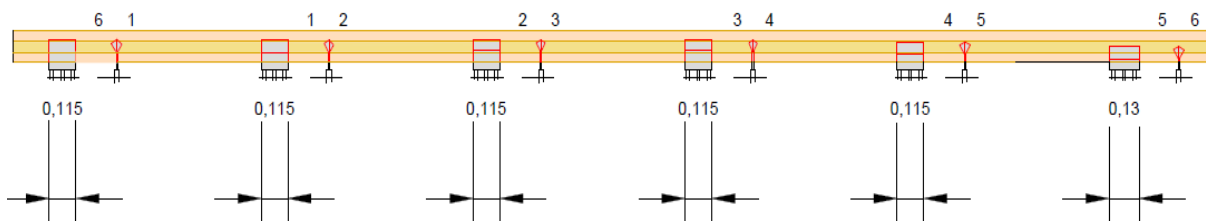


Figura 4.4 - Dimensões dos desviadores por cabos

Como já se referiu anteriormente, um dos desviadores tem dimensões laterais diferentes dos restantes, o que exigiu que, nos painéis em que este iria encaixar a altura dos entalhes a executar fosse distinta dos restantes de modo a que os cabos ficassem todos à mesma linha. Para facilitar a realização das aberturas para os desviadores, ao invés de abrir apenas o rasgo na madeira necessário para a sua adaptação, foi efetuado um corte total no painel não pondo em causa o funcionamento da ligação, como se ilustra na Figura 4.5. Num caso real com painéis entalhados em fábrica as ligações não estariam à vista.

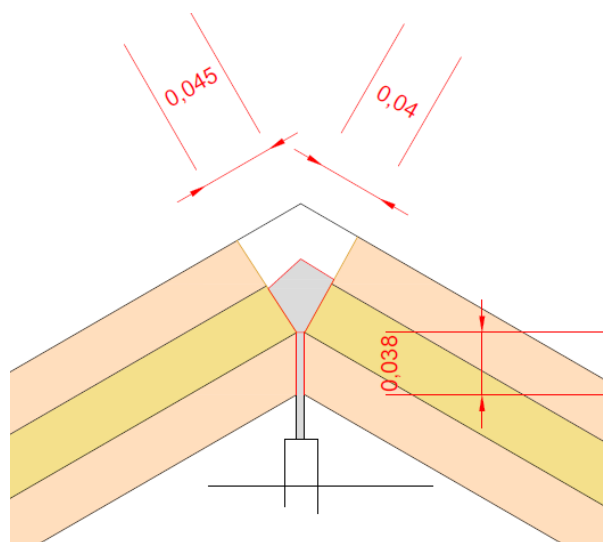


Figura 4.5 - Dimensões de entalhe a realizar num desviador por cabos em metros

Esta fase do trabalho foi de extrema dificuldade devido ao processo de carpintaria em si e ao manuseamento dos painéis dado o seu tamanho e peso, tornando-se numa tarefa demorada. Numa execução futura a nível real, todos estes entalhes seriam realizados em fábrica tornando-se de fácil aquisição e posterior aplicação.

Concluídos os entalhes a próxima etapa será a perfuração dos painéis. Este sistema foi pensado para facilitar o manuseamento e elevação destes na fase da montagem da aduela. Assim, foram realizados furos perpendicularmente ao plano dos painéis de modo a introduzir varões de aço que servirão de apoio a cintas que os içarão verticalmente com a ajuda da ponte rolante. Este método será utilizado sobretudo na fase da disposição hexagonal do CLT. Os furos com a espessura de 12 milímetros foram dimensionados através das expressões de Johansen sendo que o modo de rotura condicionante foi a o (h) (EN 1995-1-1).

Quadro 4.2 - Caraterísticas do painel de CLT

Volume do painel	299000	cm ³	0,299	m ³
Peso Volúmico do CLT	5	KN/m ³	510	Kg/m ³
Peso Volúmico do Painel	1,495	KN	152	Kg

Quadro 4.3 - Resistência da madeira

$f_{h,90,k}$	24	N/mm ²
$f_{h,0,k}$	37	N/mm ²
d	12	mm
ρ_k	510	Kg/m ³
α	1,57	rad
K ₉₀ (softwood)	1,53	

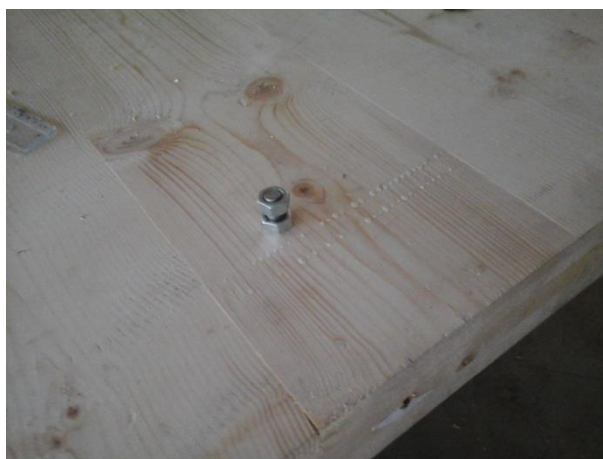
Quadro 4.4 - Modo de rotura condicionante (h)

t_2	34	mm
d	12	mm
$f_{h,90,k}$	24	N/mm ²
$F_{v,Rk}$	4,909	KN
	501	Kg



Fotografia 4.4 - Varão de aço colocado perpendicularmente ao plano do painel

O espaçamento dos furos também foi calculado através da EN 1995-1-1 pela tabela 8.4 que se refere a valores mínimos do espaçamento de parafusos. O valor mínimo calculado foi 84 milímetros a partir da borda do painel, sendo que o adotado foi de 15 centímetros. A perfuração dos painéis apenas foi realizada aquando da sua retirada da sala climatizada devido à dificuldade de manuseamento como já mencionado pelo seu peso e tamanho.



Fotografia 4.5 - Distância da perfuração efetuada a partir do bordo do
painel

A última tarefa a realizar prende-se com a aplicação dos extensómetros nos varões de aço. Estes foram colados a meio vão dos varões de aço e na longitudinal, para medição das extensões axiais e, a partir destas, da força circunferencial induzida pelo aperto das porcas de extremidade. Com vista à colagem dos extensómetros, e porque os varões são roscados efetuou-se uma abrasão das estrias e posterior lixamento de modo a obter uma superfície o mais lisa possível. Depois disso limpou-se a zona de colagem com acetona por forma a remover todos os vestígios de gordura existentes. A colagem foi efetuada através de uma cola própria para o efeito (cola de cianoacrilato).



Fotografia 4.6 - Varões de aço com extensómetros aplicados

Os fios condutores dos extensómetros foram depois soldados a cabos condutores e ligados ao Data Logger.



Fotografia 4.7 - Extensómetros soldados a cabos

4.3 Montagem em Laboratório

O processo de montagem da aduela em laboratório foi bastante mais fácil e rápido que do que o inicialmente esperado. A montagem da estrutura não demorou mais de um dia a ser concluída, o que é ótimo tendo em conta a dimensão da aduela, o peso dos painéis e a insciência em termos de planeamento de trabalho. Esta rapidez deveu-se essencialmente ao sistema de ligadores utilizados, comprovando a sua enorme utilidade em termos construtivos.

O primeiro passo foi a remoção dos painéis da sala climatizada. Esta teve de ser auxiliada com um monta-cargas e realizada com algum cuidado devido ao curto espaço de manobra na sala. Uma vez transportados para a nave do laboratório, os painéis tiveram de ser movidos para um local com área considerável para a montagem necessitando de pelo menos 2.40 por 2.10 metros. O transporte para o local definido foi feito por recurso à ponte rolante, tendo sido os painéis abraçados por cintas. Depois de depositados no espaço destinado à construção os painéis foram içados um a um com cintas presas aos varões de aço colocados na furação previamente executada.



Fotografia 4.8 - a) Transporte dos painéis em laboratório; b) Elevação dos painéis para disposição hexagonal

A ereção dos painéis foi feita sequencialmente, tendo os primeiros painéis sido provisoriamente estabilizados por ripas de madeira aparafusadas aos topos do CLT e fixadas ao pórtico metálico adjacente. A partir da ligação do terceiro painel, o conjunto tornou-se estável e aquele travamento deixou de ser indispensável. À medida que os painéis iam sendo posicionados as ligações tiveram logo de ser introduzidas nos respectivos entalhes, e para não gerar inclinações nas peças metálicas devido ao seu peso foram aplicadas pequenas chapas de aço sob estas conferindo algum suporte. No último painel a ser introduzido foi executada uma entrada de serviço com sensivelmente 50 centímetros de lado, pela qual se acedia ao interior do hexágono, onde foi colocada uma mesa com o Data Logger, para minimizar os comprimentos das calibragens e evitar ocupação de espaço exterior e o risco de um choque acidental causado por outras operações decorrentes no local.

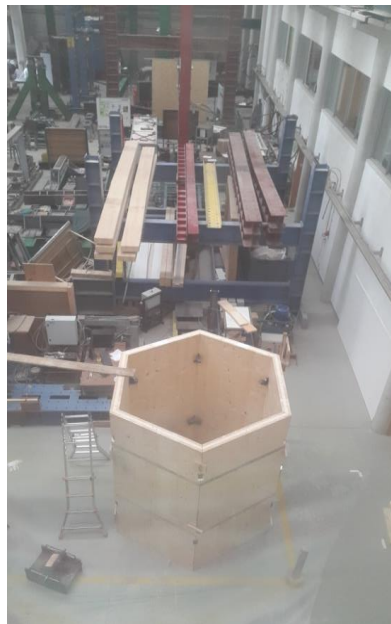


Fotografia 4.9 - Sequência de montagem da aduela de torre eólica em CLT



Fotografia 4.10 - Continuação da sequência de montagem

Depois da junção total dos painéis foram colocadas por segurança cintas em torno da aduela e retiradas as ripas de suporte nos topos. Os varões e cabos de aço foram introduzidos nas respectivas ligações e foi conferida uma tensão mínima de aperto de forma a estabilizar e unir os painéis.



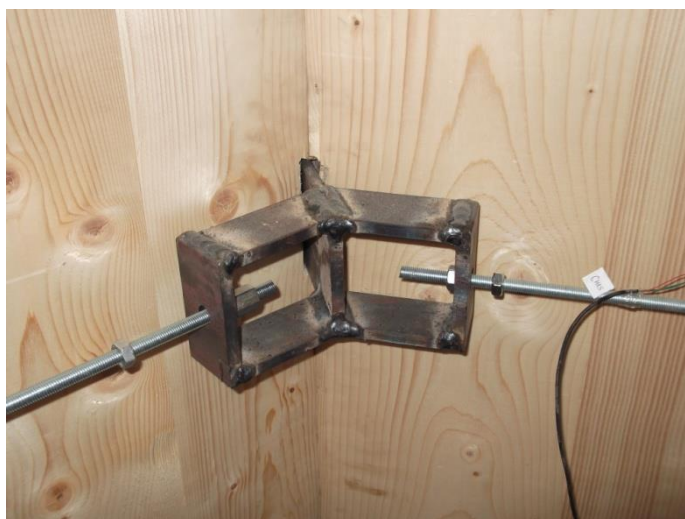
Fotografia 4.11 - Aduela de torre eólica em CLT

5 LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS

5.1 Aperto das Ligações ao Nível das Plataformas

O presente capítulo tem como objetivo primordial o estudo das ligações das juntas verticais entre os painéis de CLT ao nível das plataformas de serviço. O ensaio visava essencialmente a análise do comportamento das ligações quando sujeitas a aplicação de pré-esforço, à força necessária a aplicar para acoplar os painéis formando uma estrutura monolítica, a interação de esforços entre as ligações superiores por cabos e os desviadores por varões roscados e as perdas e assimetrias de pré-esforço, causadas pelo aperto sequencial e individual dos varões e, eventualmente, à relaxação do aço dos varões.

Finda a construção laboratorial da aduela os desviadores por cabos e os ligadores de plataforma encontravam-se dispostos nos respetivos vértices da aduela hexagonal e prontos a serem tensionados.



Fotografia 5.1 - Desviador ao nível da plataforma aplicado

Os desviadores, antes de qualquer tipo de aperto, deverão ser colocados de maneira a que a chapa de topo fique em completo contato com a superfície da madeira entalhada para receber a peça. Desta forma as forças provocadas pelo aperto dos varões roscados serão transmitidas na

totalidade à superfície destinada para o efeito originando, idealmente, uma distribuição perimetral uniforme de compressão horizontal.



Fotografia 5.2 - Vista da junção da chapa de topo do desviador com a superfície da madeira

No caso do modelo de desviador projetado para uma torre real (em losango) a premissa seria a mesma com os lados da peça a necessitarem de estar em contacto total com a superfície da madeira.

Corretamente posicionadas as peças metálicas, foi aplicado uma tensão mínima de aperto aos desviadores, por forma a ajustar os painéis ao longo das arestas de interface. Os cabos condutores soldados aos extensómetros foram ligados ao Data Logger, situado no interior da aduela para facilidade de acesso, e a cada varão foi designado um canal do aparelho por forma a ser possível interpretar os valores registados das tensões.

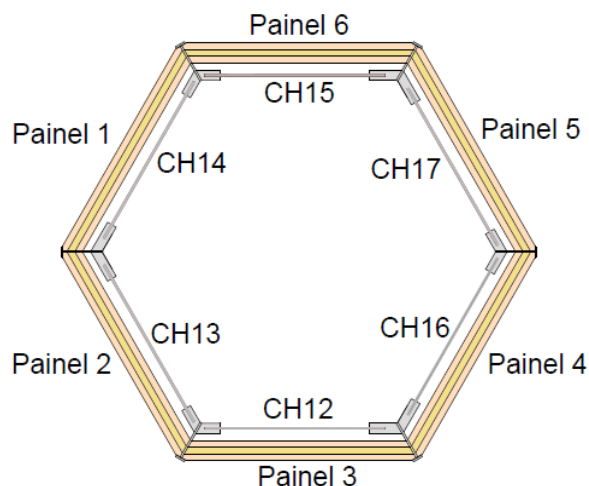


Figura 5.1 - Denominação dos painéis e extensômetros ligados aos varões

O modo como o aperto iria ser efetuado numa estrutura futura era outra das questões que se levantava. A sequência de aperto para que não ocorresse distorção transversal é importantíssima. Assim, pelo formato transversal da aduela e existindo um varão correspondente a cada um dos painéis, deliberou-se realizar o aperto alternadamente por forma a conseguir ser o mais uniforme possível. Neste caso sendo uma estrutura hexagonal procedeu-se à seguinte marcha de aplicação de pré-esforço: CH14-CH12-CH17-CH16-CH15-CH13. Poder-se-ia variar esta sequência em cada ciclo de aperto, aplicando por exemplo a atrás referida no primeiro ciclo completo e no segundo ciclo começar pelas últimas alternâncias: CH16-CH15-CH13-CH14-CH12-CH17. Este método pode ser utilizado quer numa estrutura transversalmente hexagonal, quer octogonal ou ainda decagonal. O modo de procedimento será o mesmo.

Concluída a fase de estudo do processo a implementar avançou-se para o aperto das ligações. As extensões medidas no Data Logger foram zeradas de modo a contabilizar o aperto efetuado a partir de um ponto inicial, sendo o intervalo de registo de valores de cinco em cinco segundos por forma a controlar em rigor a reação provocada nos desviadores. As primeiras ligações a serem testadas foram as superiores, matéria desenvolvida em dissertação paralela a esta. No entanto registou-se a variação de extensões na ligação inferior derivadas da interação provocada pela indução de tensões nos desviadores por cabos. É importante referir que a unidade de extensões presentes no Data Logger é $\mu\epsilon$ (microextensões) tendo o cálculo da tensão (σ) aplicada sido feita através da Lei de Hooke,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

sendo σ medida em MPa, $\mu\varepsilon$ a extensão ou valor adimensional da variação de comprimento ($\Delta l/l$) e E o Modulo de Elasticidade de valor 210 GPa. Por sua vez a força aplicada obtém-se da expressão,

$$F = \sigma \cdot A \quad (2)$$

onde A é a seção do fundo da rosca do varão a qual, como já atrás referido, é de 58 mm².

Quadro 5.1 - Extensões, tensões e forças antes e depois do aperto dos desviadores por cabos

		CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
Antes do aperto das lig. sup.	Extensão - $\mu\varepsilon$	0,000	0,000	-0,950	0,000	0,000	0,000	Adimensional
	Tensão - σ	0,000	0,000	-0,200	0,000	0,000	0,000	MPa
	Força - F	0,000	0,000	-0,012	0,000	0,000	0,000	KN
Depois do aperto das lig. sup	Extensão - $\mu\varepsilon$	-0,940	12,280	0,950	4,720	3,810	-1,890	Adimensional
	Tensão - σ	-0,197	2,579	0,200	0,991	0,800	-0,397	MPa
	Força - F	-0,011	0,150	0,012	0,057	0,046	-0,023	KN

As extensões observadas antes do início do aperto das ligações superiores devem-se ao fato de os extensômetros registarem pequenas flutuações de leituras, causadas por vibrações do local ou outros efeitos espúrios. Desse modo qualquer movimento ou vibração mais brusca no espaço laboratorial onde se encontrava a aduela construída causava oscilação nas leituras do sistema. Como se pode verificar o aperto das ligações por cabos causa alguma interação nas ligações inferiores embora os valores sejam diminutos.

Posteriormente iniciou-se o aperto das ligações de plataforma. Como se desconhecia a força necessária a aplicar para promover o ajustamento dos painéis, foram empregados vários ciclos de aperto com acréscimos moderados de tensão. A sequência de aplicação de pré-esforço utilizada foi a referida anteriormente, sendo que a cada ciclo foi tentada dar o mesmo número de voltas nas porcas (3 voltas), de modo a que não ocorresse o risco de uns varões ficarem mais tracionados que outros.

Quadro 5.2 - Pré-esforço aplicado após o primeiro ciclo

	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
Extensão - $\mu\epsilon$	36,750	83,160	-32,160	35,860	104,750	55,720	Adimensional
Tensão - σ	7,718	17,464	-6,754	7,531	21,998	11,701	MPa
Força - F	0,448	1,013	-0,392	0,437	1,276	0,679	KN

Quadro 5.3 - Pré-esforço aplicado após o segundo ciclo

	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
Extensão - $\mu\epsilon$	94,230	157,830	128,680	110,430	142,840	122,790	Adimens.
Tensão - σ	19,788	33,144	27,023	23,190	29,996	25,786	MPa
Força - F	1,148	1,922	1,567	1,345	1,740	1,496	KN

Quadro 5.4 - Pré-esforço aplicado após o terceiro ciclo

	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
Extensão - $\mu\epsilon$	158,310	250,470	244,140	217,110	232,380	220,100	Adimens.
Tensão - σ	33,245	52,599	51,269	45,593	48,800	46,221	MPa
Força - F	1,928	3,051	2,974	2,644	2,830	2,681	KN

Quadro 5.5 - Pré-esforço aplicado após o quarto ciclo

	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
Extensão - $\mu\epsilon$	393,990	487,840	485,560	446,600	451,520	454,480	Adimens.
Tensão - σ	82,738	102,446	101,968	93,786	94,819	95,441	MPa
Força - F	4,799	5,942	5,914	5,440	5,500	5,536	KN
	489,673	606,315	603,482	555,060	561,175	564,854	Kg

Como se pode avaliar dos resultados obtidos apenas foi necessária uma força de em média aproximadamente 5.5 KN para o ajustamento total da aduela hexagonal de painéis CLT com 3 lamelas, ficando muito aquém do potencial máximo dos varões de aço utilizados que possuem uma resistência à tração superior a 32 KN. Outro aspeto a ter em conta foi a semelhança de valores das forças registados em cada varão comprovando o sucesso dos resultados, tendo as forças sido corretamente distribuídas por todo o sistema de ligação nesse nível.

O último pormenor em avaliação no ensaio foram as perdas de pré-esforço, atribuíveis a ajustamentos posteriores dos painéis ou vibrações do meio ambiente, registadas num determinado período de tempo. Podem ser ainda relevantes os efeitos da relaxação do aço dos varões mas, no caso presente, pensa-se que estas terão tido pouca influência na evolução dos registos, dado o baixo nível de tensão instalada nos varões. Para uma correta avaliação, a estrutura deveria ser monitorizada durante um período mínimo de vários meses mas, devido à necessidade de utilização dos aparelhos de medição por outras entidades no laboratório, esta foi apenas submetida a avaliação por um período de 15 dias.

Quadro 5.6 - Pré-esforço após período de avaliação

	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
Extensão - $\mu\epsilon$	314,790	513,380	383,310	532,560	381,960	375,080	Adimens.
Tensão - σ	66,106	107,810	80,495	111,838	80,212	78,767	MPa
Força - F	3,834	6,253	4,669	6,487	4,652	4,568	KN
	391,239	638,058	476,400	661,896	474,722	466,171	Kg

A variação de valores de perdas de pré-esforço ao longo do tempo pode ser visualizada no gráfico seguinte.

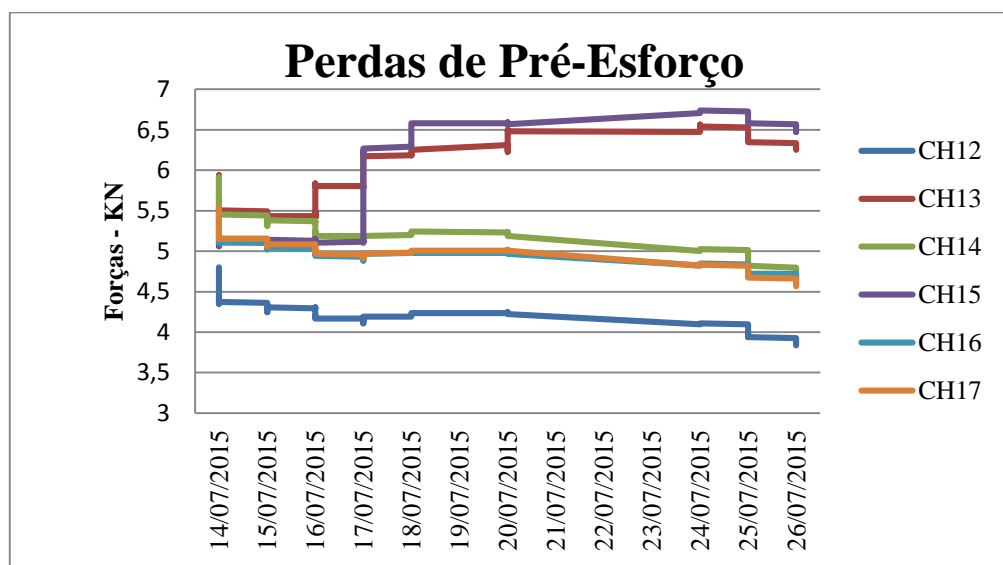


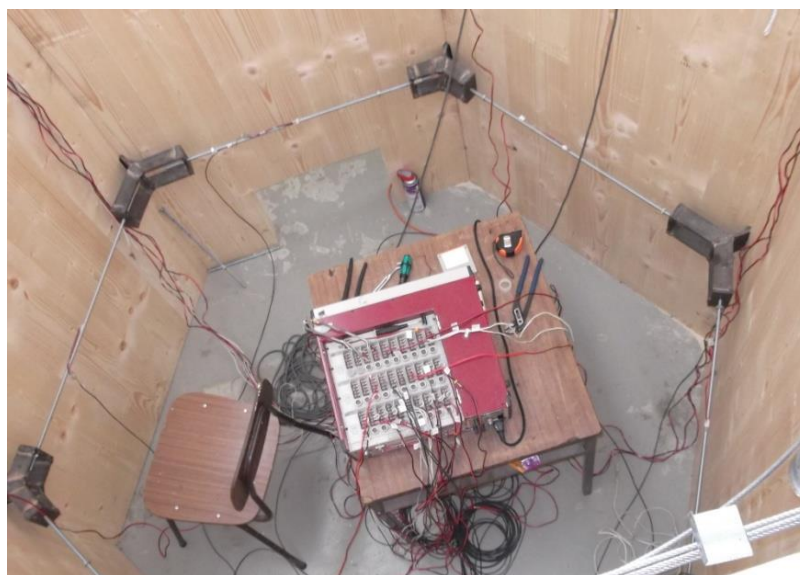
Gráfico 5.1 - Variação das perdas de pré-esforço

A percentagem de perdas registadas foram contabilizadas no quadro subsequente.

Quadro 5.7 - Percentagens de perdas de pré-esforço

	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	
P_{inicial}	4,799	5,942	5,914	5,440	5,500	5,536	KN
P_{final}	3,834	6,253	4,669	6,487	4,652	4,568	KN
ΔP	0,965	-0,311	1,245	-1,047	0,847	0,967	KN
% perdas	20,102	-5,235	21,058	-19,248	15,406	17,471	%

As variações registadas não revelam uma tendência consistente com um fenómeno de natureza mecânica, como a referida relaxação do aço dos varões. Com efeito, é patente o aumento de tensão em alguns varões e redução noutros o que, para além de eventual margem de erro de leitura dos extensómetros, sugere a ocorrência de pequenos acréscimos/decréscimos de deformação, que podem dever-se a ajustamentos dos painéis ou do conjunto da aduela, causados por vibrações. Fonte possível de erro é também o do imperfeito ajustamento dos desviadores às superfícies que recebem a sua força, dadas as condições rudimentares em que estas foram executadas. O baixo valor da força instalada torna as leituras especialmente sensíveis a todas estas causas, havendo que clarificar futuramente este aspeto, por meio da repetição do ensaio com níveis de tensão substancialmente mais elevados. É previsível, quando se conseguirem leituras fidedignas das variações diferidas de tensão, que sejam necessárias operações de reaperto, prática que é aliás comum à de outras estruturas de madeira envolvendo ações de pré-esforço, como é o caso dos tabuleiros de pontes com pré-esforço transversal.



Fotografia 5.3 - Vista superior da ligação ao nível da plataforma de serviço

5.2 Ligação nas Juntas Verticais

O segundo objetivo proposto para esta dissertação prende-se com o estudo das ligações nas juntas verticais entre os painéis de CLT. O esforço transversal atuante na torre, derivado das ações do vento, tem associados dois tipos possíveis de rotura: por corte da secção transversal da madeira e o escorregamento nas juntas verticais resultante da impossibilidade de mobilizar força tangente entre elas. As ligações estudadas no ponto anterior garantem a acoplação lateral dos painéis mas, era necessário verificar se o atrito provocado por estas garantia a inexistência de deslizamento ou se seria necessário a aplicação de mecanismos para que a secção se comporte monoliticamente.

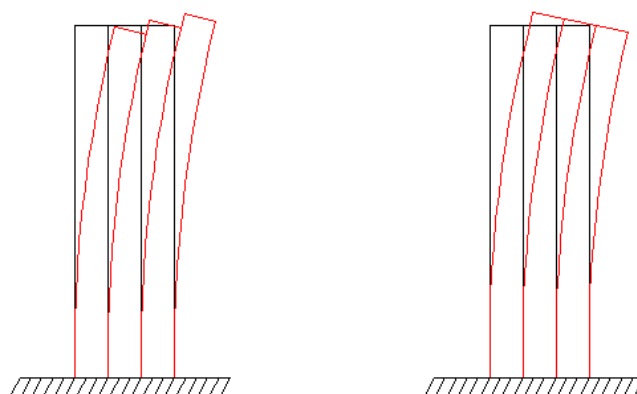


Figura 5.2 - Estrutura sem comportamento monolítico (esquerda); estrutura monolítica (direita)

Como tal procedeu-se ao cálculo das tensões atuantes na base da estrutura pois é nesta seção que o esforço transversal é mais elevado. Os dados respeitantes a esta análise são provenientes de (Ventura, 2015). A secção transversal da torre utilizada na verificação é octogonal tendo um diâmetro externo de base circunscrito de 8.00 metros e uma espessura de 0.248 metros. Estas dimensões são as que, segundo o pré-dimensionamento efetuado naquele trabalho, deveria ter a secção de uma torre com 80 metros de altura. Os painéis são constituídos por 8 lamelas, 6 com fio paralelo ao comprimento do painel e 2 com o fio perpendicular ao mesmo. Por simplificação utilizar-se-á uma secção equivalente composta por 5 lamelas no total (figura 5.4). Os valores das espessuras e_1 e e_2 são respetivamente 0.068 e 0.022 metros (Ventura, 2015).



Figura 5.3 - Painel utilizado (em cima) e painel equivalente (em baixo) (Ventura, 2015)

A tensão de corte atuante na torre foi calculada através da expressão da Resistência dos Materiais para uma secção fechada de paredes finas,

$$\tau = \frac{V S}{2 I e} \quad (3)$$

τ é a tensão de corte na secção e na fibra considerada, V o esforço transversal atuante de cálculo, I o momento de inercia, S o momento estático da parte da secção delimitada pela fibra em causa e e a largura da secção a esse nível.

Para o cálculo das tensões de corte atuantes foram utilizados valores e expressão já deduzidas na dissertação (Ventura, 2015). Na dissertação citada, o autor apenas considerou para o cálculo as lamelas que têm direção do fio paralela ao comprimento do painel (lamelas a tracejado na figura 5.4).

Como tal o momento total de inercia utilizado para o cálculo das tensões na base da estrutura foi de 33.917 m^4 (Ventura, 2015).

O momento estático calculado foi a meia secção pois as tensões tangenciais máximas ocorrem ao nível do eixo baricêntrico, sendo que no caso em questão coincide com a linha diametral.

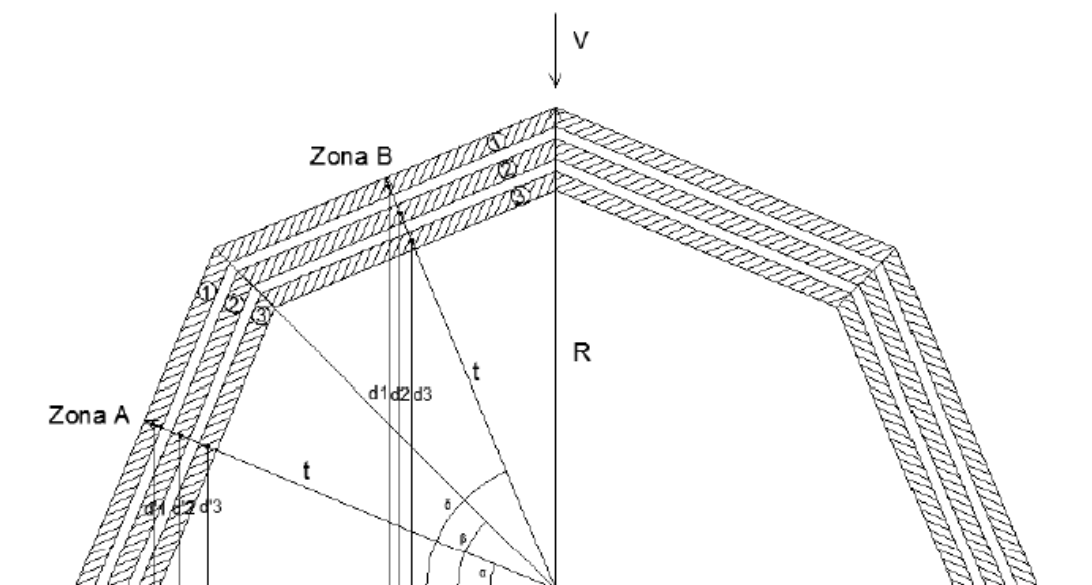


Figura 5.4 - Momento estático de meia seção (Ventura, 2015)

As expressões utilizadas foram,

$$S_{Zona A} = A. \left((3R. \cos 22.5^\circ - \frac{9e_1}{2} - 3e_2) \times \sin 22.5 \right) \quad (4)$$

$$S_{Zona B} = A. \left((3R. \cos 22.5^\circ - \frac{9e_1}{2} - 3e_2) \times \sin 67.5 \right) \quad (5)$$

com,

$$S_{total} = 2 \times S_{Zona A} + 2 \times S_{Zona B} \quad (6)$$

O valor do momento estático de meia seção foi de 5.776 m³.

O esforço transversal, derivado das ações do vento, na base da torre toma o valor de 1810 KN (Ventura, 2015). Deste modo, com uma espessura de seção de 0.204 metros, devido a apenas se considerarem as lamelas com direção do fio paralela ao comprimento do painel, obtém-se uma tensão de corte, τ_{sd} , de 0.755 MPa.

Para verificar se a resistência ao escorregamento mobilizável por atrito realizado pela compressão da acoplação através das ligações perimetrais é suficiente, foi calculado a força necessária a aplicar por metro linear nos desviadores.

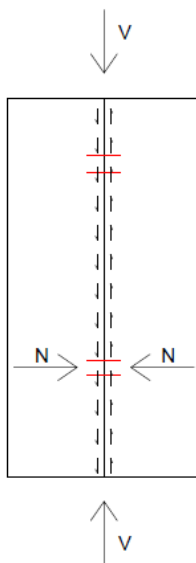


Figura 5.5 - Esquema de forças aplicadas nas juntas verticais

A partir do valor da tensão atuante de cálculo de corte, foi calculada a força de corte, V , por unidade de comprimento da junta vertical do painel, multiplicando τ_{sd} pela espessura do painel (0.204 m) e por 1 metro linear. O valor de V assim obtido é de 154122 N/m. Se a resistência a este escorregamento for da exclusiva responsabilidade do atrito mobilizada pela compressão entre painéis, valendo N por metro linear de junta, então, deverá verificar-se a condição

$$N \times \operatorname{tg}(\varphi) > V \quad (7)$$

expressão onde φ é o coeficiente de atrito madeira-madeira na interface entre os painéis. Utilizando para este parâmetro o valor $\operatorname{tg}(\varphi)=0.3$, proposto na (EN 1995-2 - Tabela 6.1), para contato entre superfícies de madeira aparelhadas obtém-se para a força N necessária realizar para resistência de atrito o valor de 513740 N/m (aproximadamente 52 toneladas por metro linear).

A tensão de compressão na madeira que esta força produziria, admitindo a força aplicada nas lamelas de fio horizontal por metro de altura seria dada pela divisão da força necessária para resistir ao atrito, com a espessura das lamelas de fio horizontal por um metro linear,

$$\tau_c = \frac{F}{A} = \frac{513740 \text{ N/m}}{44 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}} \quad (8)$$

obtendo a tensão de compressão instalada de 11.68 MPa por metro linear, sendo esta menor que a tensão resistente de compressão paralela ao fio da madeira, $f_{c,0,k}$, 30 MPa (Quadro 4.1).

Para realizar esta força com os sistemas de pré-esforço perimetrais utilizados foi pré-dimensionada a seção necessária a aplicar por metro linear. Apenas foram considerados os anéis perimetrais de pré-esforço por varões roscados. Admitindo uma classe para o varão de 6.8 com um valor de tensão de cedência, f_{yb} , de 480 MPa, a partir da expressão,

$$f_{yb} = \frac{F}{A_s} \quad (9)$$

foi dimensionada a seção de varão M42, com um A_s de 1121 mm², para um valor de A_s de cálculo de 1070 mm².

Dado o valor de N necessário ser bastante grande, requerendo seções maiores e menos económicas para o sistema de pré-esforço, foi pensado distribuir percentualmente a força aplicada pelos desviadores que provocam atrito nas juntas, e a força cortante por metro vertical nas juntas através de cunhas (em aço em princípio).

O primeiro passo é verificar se a tensão de corte atuante é inferior á tensão de cálculo da resistência ao corte da madeira. Para o cálculo de $f_{v,d}$, o valor característico de resistência ao corte, $f_{v,k}$, é de 5.2 MPa (Quadro 4.1); k_{mod} é obtido do Quadro 3.1 de (EN 1995-1-1), admitindo classe de serviço 2 e ações de curta duração (Ventura, 2015); e o coeficiente parcial de segurança, γ_M , é obtido do Quadro 2.3 (EN 1995-1-1).

$$f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0.9 \times \frac{5.2}{1.25} = 3.7 \text{ MPa} \quad (10)$$

Como $\tau_{sd} < f_{v,d}$ a resistência ao corte está garantida.

Para o cálculo do espaçamento entre as cunhas a aplicar, s , e a largura destas, t , é necessário o valor de cálculo da resistência à compressão na direção paralela às fibras da madeira, $f_{c,0,d}$. O valor característico, $f_{c,0,k}$, foi retirado uma vez mais do Quadro 4.1, nas características resistentes para ações no plano do painel. O seu valor é de 30 MPa.

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0.9 \times \frac{30}{1.25} = 21.6 \text{ MPa} \quad (11)$$

As duas variáveis, s e t , vão variar na razão inversa uma da outra. Para cada s teremos um t correspondente.

$$B \times t \times f_{c,0,d} > \tau_{sd} \times B \times s \quad (12)$$

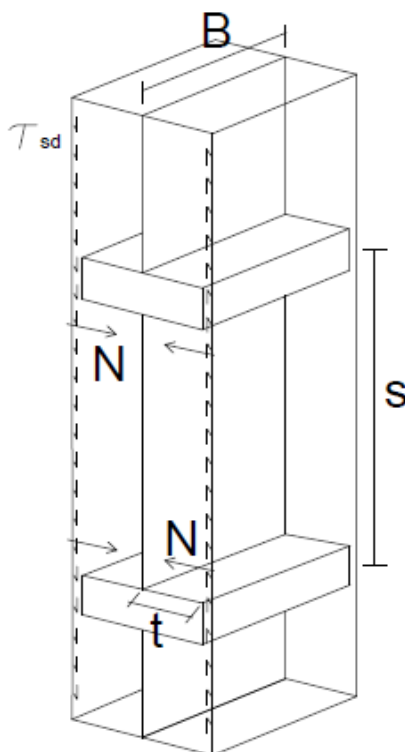


Figura 5.6 - Esquema de cálculo dos espaçamentos e larguras das cunhas entre juntas verticais

Distribuindo, como foi atrás referido, a percentagem de tensão de corte aplicado para a determinação da dimensão e espaçamento entre as cunhas de controlo de deslizamento, foi elaborado o quadro da página seguinte.

Quadro 5.8 - Larguras e espaçamentos entre cunhas para tensão de corte aplicada

% de tensão atribuída às cunhas		0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
Espessura "t" (mm)		t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
Distância "s" (mm)	500	0	2	3	5	7	9	10	12	14	16	17
	1000	0	3	7	10	14	17	21	24	28	31	35
	1500	0	5	10	16	21	26	31	37	42	47	52

No gráfico seguinte ficam mais perceptíveis os valores do quadro anterior.

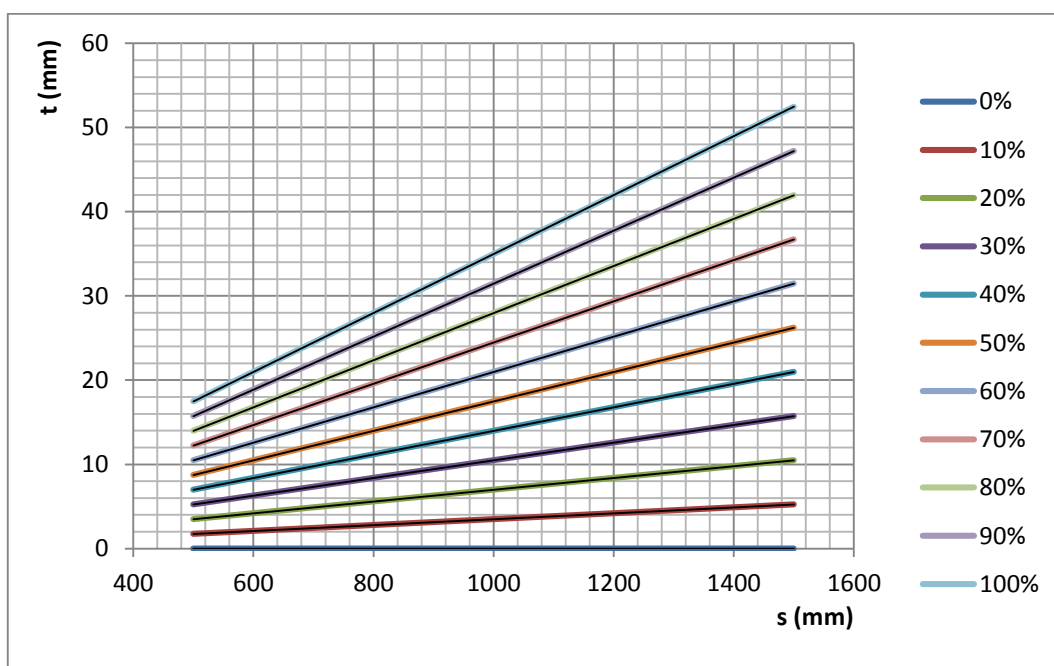


Gráfico 5.2 - Larguras e espaçamentos entre cunhas para a tensão de corte aplicada

Foi realizado ainda outro gráfico demonstrativo da relação dos espaçamentos e larguras das cunhas a aplicar, mas este, calculado a partir do valor de cálculo da resistência ao corte da madeira.

$$B \times t \times f_{c,0,d} > f_{v,d} \times B \times s \quad (13)$$

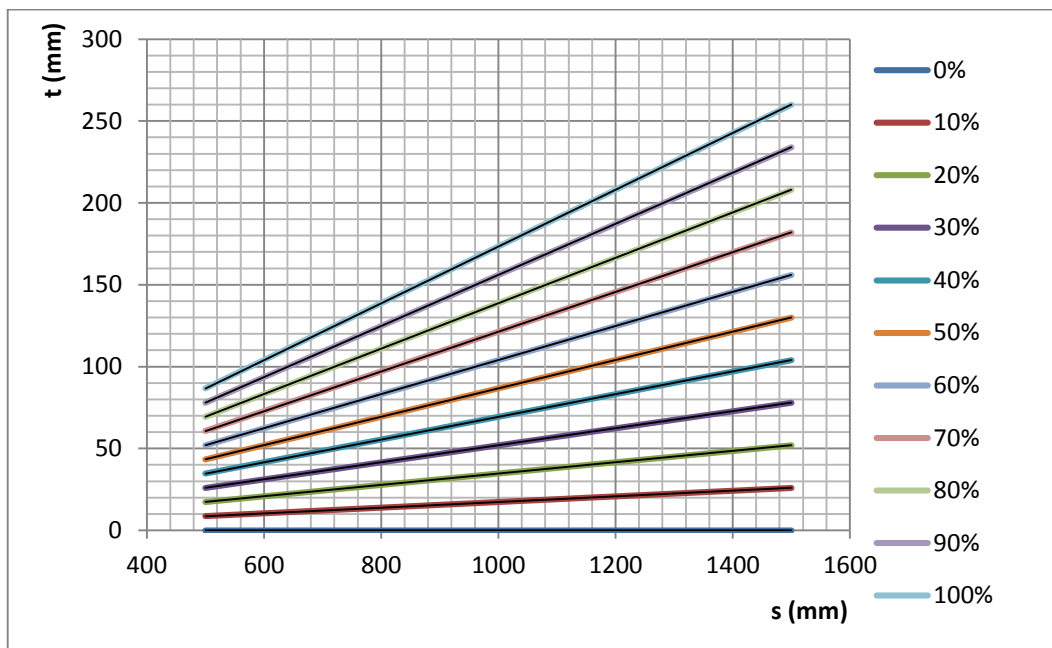


Gráfico 5.3 - Larguras e espaçamentos entre cunhas para o valor de cálculo da resistência ao corte

6 CONCLUSÕES

As vantagens associadas à construção de torres eólicas em CLT pela empresa alemã TimberTower são relevantes, respondendo de forma adequada a problemas de transporte existentes em outros tipos de torre, oferecendo o benefício ambiental decorrente da substituição do aço por um material essencialmente natural, com muito menor custo energético de produção, e facilitando a aceitação da proximidade das torres pelas comunidades locais, devido à sua elaboração por um produto natural.

A estas vantagens, o inovador sistema de ligações proposto na presente dissertação adiciona: o fato de não haver necessidade de uma estrutura interior para erigir e acoplar os painéis; a utilização de uma grua interior permitindo o trabalho contínuo em períodos de intempérie, sendo este sistema de elevação ligeiro e desmontável dispensando igualmente qualquer transporte especial para o efeito; e uma maior homogeneidade em termos de dimensões dos painéis levando a menores custos de fabricação. A única desvantagem encontrada é a necessidade da utilização de uma grua de grandes dimensões para a elevação e colocação do aerogerador, o que apenas torna o sistema competitivo na construção de parques eólicos com várias torres, de modo a diluir o custo da grua por efeito de economia de escala.

A facilidade de montagem demonstrada aquando da construção laboratorial da aduela de torre eólica, foi mais uma evidente vantagem deste sistema de ligadores perimetrais pré-esforçados. Numa construção futura, o corte pré-fabricado dos painéis e a produção de desviadores em série conduzirá a uma ainda maior desenvoltura no processo de montagem.

Relativamente ao estudo das ligações ao nível das plataformas de serviço foram atingidos maioritariamente os objetivos propostos: foi estudada uma sequência de aperto para o anel perimetral de pré-esforço por forma a uniformizar ao máximo a aplicação de força para a acoplação dos painéis; a acoplação foi conseguida com uma força média uniforme ao longo da aduela bastante abaixo do máximo suportado pelos varões de aço o que deixaria uma grande margem para o procedimento em painéis de maiores dimensões; as interações entre os dois sistemas de ligações, os cabos perimetrais e o anel de pré-esforço, foram diminutas possivelmente devido ao baixo teor de força aplicada e ao afastamento entre os dois sistemas.

As variações de tensões não revelaram efeitos de relaxação do aço dos varões e além disso é verificado uma inconsistência em termos de perdas de pré-esforço. Erros de leitura dos extensómetros, o ajustamento dos painéis ao acoplar, ou o deficiente ajuntamento dos desviadores às superfícies onde estão aplicados, são condições que podem explicar os resultados obtidos na execução do aperto experimental. Presumivelmente, mais uma vez devido à baixa força aplicada, estes condicionantes tiveram um impacto mais significativo nos resultados.

Futuramente é recomendável a realização de novos ensaios, com tensões de aperto maiores que as registadas neste estudo preliminar, com o propósito de se conseguirem leituras mais fiáveis de perdas de pré-esforço e a eventual necessidade de proceder a operações de reaperto, como acontece noutras estruturas de madeira nas quais o pré-esforço é utilizado.

No estudo relativo às juntas verticais entre os painéis de CLT, os objetivos foram igualmente alcançados. No escorregamento das juntas verticais, foi verificada a incapacidade de acoplação dos painéis ao longo da altura da torre exclusivamente através do atrito provocado pelas forças horizontais das ligações perimetrais, sendo necessário à implementação de mecanismos (cunhas) que impeçam o referido escorregamento. Neste tópico foram realizados gráficos demonstrativos das dimensões e espaçamentos das cunhas a implementar relativamente ao esforço atuante e à capacidade resistente do CLT.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWEA, (2008). "Wind Energy Siting Handbook". American Wind Energy Association.

Cunha, J., Carrasco, E., Branco, J., Lourenço, P., (2012). "Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT) Utilizando Parafusos Autoperfurantes". Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro, Brasil.

CEN (2003). "EN1995-1-1:2003 Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings". European Committee for Standardization.

CEN (2004). "EN1995-2:2004 Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 2: Bridges". European Committee for Standardization.

CEN (2005). "NP EN1991-1-4:2005 Eurocódigo 1 - Ações em estruturas, Parte 1-4: Ações gerais - Ação do Vento". European Committee for Standardization.

CEN (2005). "NP EN1993-1-8:2005 Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço, Parte 1-8: Projeto de ligações". European Committee for Standardization.

Engström, S., Lyrner, T., Hassanzadeh, M., Stalin, T., Johansson, J., (2010). "Tall towers for large wind turbines". Report from Vindforsk project V-342 Hõga torn for vindkraftverk, Suécia.

FPInnovations (2011). "CLT Handbook: Cross laminated timber". Ed. por S. Gagnon e C. Pirvu, Canadá.

Hau, E, "Wind Turbines - Fundamentals, Technologies Application, Economics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2ªed, ISBN-13 978-3-540-24240-6, Berlin, 2006.

Marcelo Gustavo Molina and Juan Gimenez Alvarez (2011). Technical and Regulatory Exigencies for Grid Connection of Wind Generation, Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment, Dr. Gastão Orlando Suvire (Ed.), ISBN: 978-953-307-483-2, Intech, DOI: 10.5772/16474. Available from: <http://www.intechopen.com/books/wind-farm-technical-regulations-potential-estimation-and-siting-assessment/technical-and-regulatory-exigencies-for-grid-connection-of-wind-generation>

Mathew, S. (2006). "Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany.

Moura, A. (2012). "Análise comparativa de torres eólicas em aço e híbridas aço-betão para alturas e potências variáveis". Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Silva, V. (2004). "Mecânica e Resistência dos Materiais". ZUARI – Edição de Livros Técnicos, L^{da}. Coimbra, Portugal.

Simões, F. (2015). "Sistemas de Ligação entre Painéis de Torres Eólicas em Madeira Lamelada Colada Cruzada". Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Valido, A., Silva, J. (1997). Introdução à Extensometria Elétrica de Resistência. Escola Superior Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Setúbal, Portugal.

Ventura, D. (2015). "Torres Eólicas em Madeira Lamelada Cruzada Colada". Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

AmbienteMagazine@ (2015). <http://www.ambientemagazine.com>.

APREN@ (2015). <http://www.apren.pt>. Associação Portuguesa de Energias Renováveis (página internet oficial), Portugal.

AWEA@ (2015). <http://www.awea.org>. American Wind Energy Association.

DWIA@ (2012). <http://www.windpower.org>. Danish Wind Industry Association.

EWEA@ (2015). <http://www.ewea.org>. The European Wind Energy Association.

KLH UK@ (2015). <http://www.klhuk.com/>, Londres.

TimberTower@ (2015). <http://www.timbertower.de/en/>. Timber Tower, Alemanha.

WindPowerEngineering@ (2015). <http://www.windpowerengineering.com>.