



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

# **Sistemas de Ligação entre Painéis de Torres Eólicas em Madeira Lamelada Colada Cruzada**

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

**Autor**

**João Francisco Rodrigues de Micaelo Simões**

**Orientadores**

**João Henrique Jorge de Oliveira Negrão**

**Luís Filipe de Carvalho Jorge**

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

**Coimbra, Julho, 2015**

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com a orientação e apoio do Professor João Negrão e do Professor Luís Jorge que me transmitiram conhecimentos valiosos, essenciais para o meu futuro. Aos dois o meu enorme reconhecimento.

Ao Senhor David, um grande obrigado pela disponibilidade e eficiência demonstradas no fabrico de muitos dos elementos necessários à realização dos ensaios.

O meu agradecimento ao Carlos Martins e ao André Marques pela colaboração preciosa na montagem da aduela da torre eólica.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmão, o meu muito obrigado pela compreensão e apoio incondicionais no decurso desta etapa.

A todos os meus amigos, um grande obrigado pelo companheirismo e boa disposição com que sempre me acompanharam.

Finalmente, à Diana, um obrigado muito especial pelo seu incentivo, motivação e carinho demonstrado ao longo de todo o curso.

## RESUMO

Para aumentar a potência instalada numa turbina eólica é necessário utilizar torres de maior altura. O aumento da altura implica repensar as soluções existentes, sendo que a madeira lamelada colada cruzada (CLT) se apresenta como uma alternativa viável. A utilização do CLT oferece características vantajosas como a facilidade de transporte e a redução da emissão de gases nocivos para a atmosfera, factor cada vez mais relevante nos tempos actuais.

Está a ser desenvolvido um novo conceito de torre eólica, composto por cabos perimetrais localizados no interior da estrutura hexagonal oca. Estes, ao serem traccionados, exercem uma força que é desviada para a madeira através de peças em aço que comprimem os painéis uns contra os outros, formando secções monolíticas. Deste modo, o objectivo principal desta dissertação consiste na montagem de uma aduela de torre eólica em CLT, testar o sistema de compressão dos painéis e compreender o seu funcionamento.

Este conceito é inovador pela inexistência de uma estrutura de suporte interior e, pelo método de montagem que permite que seja efectuada em situações climáticas adversas.

Toda a informação recolhida na montagem deste projecto, particularmente por se tratar de uma primeira abordagem, reveste-se de especial relevância para futuros projectos a desenvolver nesta área, nomeadamente a observação de perdas excessivas nos desviadores por atrito e flexão lateral, bem como as perdas no aperto com esticadores, que não permitiram obter resultados conclusivos.

Paralelamente a este estudo, foi ainda analisada uma ligação entre aduelas, com recurso a chapas metálicas coladas entre cortes longitudinais nos painéis, para transmitir os esforços de tracção desde o topo à fundação da torre.

**Palavras Chave:** CLT, Cabo de aço, Desviador em aço, Energia eólica, Torre eólica

## ABSTRACT

To increase the power of a wind turbine it is necessary to increase the hub height of its tower. The increase in height of the towers requires rethinking existing solutions, with Cross Laminated Timber (CLT) presenting itself as a viable alternative. Among CLT's advantageous features it's important to highlight its ease of transportation and its low-polluting factor, which grows more relevant by the day.

A new wind turbine concept is being developed comprising perimetral cables located on the inside of the hexagonal, hollow structure. These, by being tractioned, exert a force that is dissipated through the steel diverters to the wood, compressing the panels against each other, forming monolithic sections. In this context, the main purpose of this dissertation is to assemble a wind turbine stave with CLT, test the panel compression system and understand its inner workings.

This concept is innovative because it does not require an inner supporting structure and it can be assembled even in harsh weather conditions.

This project is a first approach in the field and as such, information collected during its assembly will be relevant to future studies. While results regarding the excessive losses in diverters friction and lateral flexion and losses in the grip with turnbuckles were inconclusive, the observation will certainly be valuable.

Parallel to this study, an analysis of stave connections was also conducted, employing glued metal plates between longitudinal cuts of the panels to transmit tractions from panel to panel.

**Keywords:** CLT, Steel Cable, Steel Diverter, Wind Energy, Wind Turbine

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objectivo e Motivação .....	2
1.2	Estrutura da dissertação .....	2
2	ESTADO DA ARTE .....	4
2.1	Energia eólica moderna e suas origens .....	4
2.2	A energia eólica no mundo .....	7
2.3	Classificação de torres eólicas .....	10
2.4	Tipos de torres eólicas e respectivos processos construtivos .....	11
2.4.1	Torres em aço soldado .....	12
2.4.2	Torres em aço aparafusado .....	16
2.4.3	Torres em betão .....	17
2.4.4	Torres híbridas aço/betão .....	19
2.4.5	Torres treliçadas .....	20
2.4.6	Torres em madeira .....	20
3	FUNCIONAMENTO E MONTAGEM DA TORRE EM CLT .....	23
3.1	Ligação entre painéis em CLT .....	23
3.2	Montagem da Torre .....	28
4	METODOLOGIA DE ENSAIO E ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS .....	29
4.1	Objectivo .....	29
4.2	Ensaio preliminar .....	29
4.3	Ensaio da aduela da torre eólica .....	32
5	LIGAÇÃO ENTRE ADUELAS COM CHAPAS DE AÇO .....	42
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Estruturas para bombeamento de água na China Antiga (Hau, 2006). .....	4
Figura 2-2 - MOD-0 (Dodge, 2015). .....	6
Figura 2-3 - Evolução da altura e potência das torres eólicas comerciais (Worldsteel Association). .....	7
Figura 2-4 - Capacidade Instalada de Energia Eólica em GW (GWEC).....	9
Figura 2-5 - Evolução da produção eólica e equipamentos instalados em Portugal (APREN). 9	
Figura 2-6 - Componentes de uma turbina eólica (Worldsteel Association). .....	11
Figura 2-7 - Chapas de aço a tomarem forma cónica (Wind Power Engineering & Development, 2015). .....	12
Figura 2-8 - Secção de uma turbina eólica (Schaumann & Collmann, 2013). .....	13
Figura 2-9 - Transporte de uma pá (Wind Technologies, 2011). .....	14
Figura 2-10 - Tipos de ligação entre a torre e a fundação (Training Course, 2011). .....	15
Figura 2-11 - Torre de elevação (Engström et al, 2010). .....	16
Figura 2-12 - Pormenor da ligação numa torre sem soldaduras (Veljkovic, et al., 2010).....	17
Figura 2-13 - Construção de torre em betão com elementos pré-fabricados (INNEO - Precast Concrete Wind Towers, 2008).....	19
Figura 2-14 - Torre híbrida aço/betão (Reve, 2015).....	20
Figura 2-15 - Montagem da torre (TimberTower, 2014).....	21
Figura 2-16 - Pormenor de cortes na madeira para introdução das chapas de aço (TimberTower, 2014). .....	22
Figura 3-1 - Diagrama com as forças envolvidas no sistema. ....	24
Figura 3-2 - Esquema das ancoragens (imagem cedida pelo Prof. João Negrão). .....	25
Figura 3-3 - Vista lateral de um desviador. ....	26
Figura 3-4 - Vista superior de um desviador. ....	26
Figura 3-5 - Esquema de ancoragem em painel com 5 lamelas (imagem cedida pelo Prof. João Negrão). .....	27
Figura 3-6 - Plataforma metálica (imagem cedida pelo Prof. João Negrão). ....	27
Figura 3-7 - Sequência de montagem (imagem cedida pelo Prof. João Negrão). .....	28
Figura 4-1 - <i>Setup</i> do ensaio preliminar (imagem cedida pelo Prof. João Negrão). .....	30

---

Figura 4-2 - Ensaio de uma ligação entre duas secções de madeira.....	30
Figura 4-3 - Pormenor da ligação madeira-desviador. ....	31
Figura 4-4 - Painéis de CLT. ....	33
Figura 4-5 - Alçado desviadores em aço (imagem disponibilizada por Prof. João Negrão). ....	33
Figura 4-6 - Desviadores em aço para 3 cabos.....	33
Figura 4-7 - Sequência de montagem da aduela: a) movimentação dos painéis; b) erecção dos painéis individualmente; c) conexão dos painéis através de ripas de madeira.....	36
Figura 4-8 - Aduela da torre eólica em CLT e ligações no interior.....	37
Figura 4-9 - Cabos de aço e esticador do cabo inferior. Desviador instalado na madeira. ....	38
Figura 4-10 - Numeração dos desviadores. ....	38
Figura 4-11 - Defletómetros instalados no cabo superior. ....	40
Figura 4-12 - Secções do cabo superior analisadas. ....	40
Figura 5-1 - Ligação com chapas de aço: a) Alçado; b) Vista Superior.....	42

## SIMBOLOGIA

$E_{0,mean}$  – Módulo de elasticidade paralelo às fibras

$E_{90,mean}$  – Módulo de elasticidade perpendicular às fibras

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

$G_{90,mean}$  – Módulo de distorção 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

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

$f_{m,d}$  – Valor de cálculo da resistência à flexão

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

$f_{t,90,k}$  – Valor característico da resistência à tracção perpendicular as fibras

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

$f_{v,d}$  – Valor de cálculo da resistência ao corte

$f_{v,R,k}$  – Valor característico da resistência ao corte na direcção perpendicular às fibras (*rolling shear strength*)

$k_{mod}$  – Factor de correcção para a duração das acções e para o teor em água

$\gamma_M$  – Coeficiente parcial de segurança do material



## 1 INTRODUÇÃO

O mundo em que habitamos enfrenta hoje, mais do que nunca, desafios energéticos para as gerações vindouras. É do conhecimento geral que os combustíveis fósseis, como o carvão, petróleo ou gás natural, são recursos finitos e irão esgotar-se num futuro relativamente próximo.

Assim, o século XXI é o século onde se terão de encontrar soluções para a produção de energia. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) é expectável que o consumo de energia aumente 37% a nível mundial nos próximos 25 anos devido ao crescimento da população mundial e desenvolvimento de países como a China ou a Índia (World Energy Outlook, 2014).

É neste contexto que surge o conceito de energia renovável, isto é, energia que pode ser obtida a partir de recursos naturais, como o sol ou o vento, que são naturalmente reabastecidos e que apresentam uma grande vantagem: são inesgotáveis. Para além disso, há que considerar que a utilização de combustíveis fósseis provoca a emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera, que a curto prazo, serão incomportáveis para a subsistência do planeta Terra. Pelo contrário, as energias renováveis, como a energia eólica que se aborda nesta dissertação, são consideradas limpas. Como refere a Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), "por cada MWh de energia eléctrica de origem eólica são reduzidas entre 0,8 a 0,9 toneladas de emissões de gases com efeito de estufa que seriam produzidas pela utilização dos combustíveis fósseis na produção de energia eléctrica".

Contudo, o uso corrente da expressão "energias limpas" é um erro comum pois não existe nenhum tipo de energia que não emita gases nocivos. Particularizando sobre a energia eólica, a maioria das torres eólicas são feitas em aço (tanto o corpo principal como outras componentes - pás e rotor), cuja produção depende do carvão. É também utilizado betão nas fundações, cuja produção é uma das principais emissoras de CO<sub>2</sub>. É ainda necessário transportar os materiais para o local, montar a estrutura e realizar toda a manutenção ao longo do seu ciclo de vida. Todas estas acções provocam emissão de gases para a atmosfera, no entanto esta é bastante inferior àquela que é emitida pelos combustíveis fósseis.

Assim, para além de ser importante apostar na energia eólica para atingir os objectivos da União Europeia (UE), de reduzir em 20% as emissões de gases com efeito de estufa em 2020 relativamente a 1990, é essencial usar outros materiais na produção das torres eólicas que contribuam para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, como é o caso da madeira lamelada colada cruzada (CLT - *Cross Laminated Timber*). O CLT é um material capaz de dar resposta aos objectivos de sustentabilidade, preenchendo igualmente os requisitos estruturais de uma torre eólica.

## 1.1 Objectivo e Motivação

Ao longo das últimas décadas têm-se estudado e testado várias alternativas para a produção de energia eólica, variando a tipologia das torres, como rotor horizontal ou vertical, e materiais empregues no fabrico da torre, desde o comum aço à combinação de betão com aço (torres híbridas). Neste âmbito, a TimberTower, uma empresa sediada na Alemanha, está a inovar com o desenvolvimento de torres eólicas construídas em painéis de madeira lamelada colada cruzada (TimberTower, 2014).

O objectivo desta dissertação é estudar uma alternativa ao processo construtivo usado por esta empresa, ensaiando protótipos de alguns dispositivos de ligação previstos para a junção dos painéis CLT, compostos por desviadores metálicos e cabos de aço. Em função da experiência adquirida no seu processo de montagem e na observação e análise dos resultados, serão ajustados os procedimentos construtivos previstos no sistema, com o intuito de alcançar uma solução tecnicamente viável.

## 1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, sendo o primeiro constituído pela introdução ao tema desenvolvido, referindo a motivação para a sua realização.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica que, partindo de uma visão mais vasta e abrangente, se vai direccionando com mais pormenor até ao foco desta dissertação. Assim, no estado da arte salientam-se as origens da energia eólica e a sua evolução até ao presente, passando pelo seu uso a nível mundial assim como pelos vários processos construtivos de diferentes torres. Por último, procede-se à análise dos primeiros protótipos de torres eólicas em CLT.

No terceiro capítulo é descrito pormenorizadamente o modo de funcionamento da torre em CLT, objecto deste trabalho, com recurso a cabos de aço e desviadores instalados entre os painéis de CLT assim como o procedimento de montagem da mesma.

No quarto capítulo são justificados e sistematizados os ensaios desenvolvidos, são caracterizados fisicamente os materiais utilizados na montagem da aduela de uma torre eólica, e descritos todos os aspectos relevantes subjacentes à sua concepção. Seguidamente, procede-se à apresentação e análise dos dados recolhidos nos ensaios experimentais e à discussão criteriosa dos resultados obtidos.

No capítulo quinto é realizado o estudo de um sistema de ligação entre painéis nas juntas horizontais, com recurso a chapas de aço, para transmitir as forças de tracção ao longo da torre até à base.

No último capítulo apresentam-se as principais conclusões desta dissertação, assim como perspectivas e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros que contribuam para o progresso da tecnologia das torres eólicas em CLT.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Energia eólica moderna e suas origens

Para compreender as turbinas eólicas recentes é necessário recuar às raízes históricas da tecnologia da energia do vento, pois foram os sucessos e fracassos do passado que permitiram a evolução das torres para o que são hoje e ainda continuam a fornecer dicas para desenvolvimentos futuros.

A utilização da energia do vento não é uma tecnologia recente, remontando ao século X, na Pérsia, onde surgiram os primeiros moinhos de eixo vertical, fabricados em pedra e pás de madeira. Os primeiros mecanismos que dependiam do vento convertiam a energia do vento em energia mecânica, sendo usados na moagem dos cereais. Por volta do século XIII, apareceram na China rodas de vento cuja função era drenar os campos de arroz (Figura 2-1). É notável que estas simples estruturas de eixo vertical funcionavam apenas com canas de bambu e velas em tecido (Hau, 2006). Os sistemas em madeira para o aproveitamento do vento têm mais de 800 anos.



Figura 2-1 - Estruturas para bombeamento de água na China Antiga (Hau, 2006).

Foi também no século XIII que surgiram na Europa os primeiros sistemas com eixo horizontal: os famosos moinhos. Estas estruturas foram evoluindo, apresentando características que se mantêm essenciais nas turbinas eólicas actuais: o topo da estrutura rodava para posicionar as pás perpendicularmente ao vento (nas turbinas eólicas a *nacelle* e as pás giram na direcção do vento para garantir máximo rendimento) e era possível regular a velocidade de rotação das pás e potência da torre com recurso a velas especiais (Manwell,

---

McGowan, & Rogers, 2002). Com a Revolução Industrial e o aparecimento das máquinas a vapor, os moinhos perderam importância, mas em meados do século XIX estima-se que existiam 200 mil na Europa, com particular destaque na Holanda (Hau, 2006).

Durante o ano de 1887, o americano Charles Brush desenvolveu em Cleveland, Ohio, a primeira turbina eólica para gerar electricidade. Tinha 18 metros de altura, um rotor de 17 metros de diâmetro com 144 pás, mas apenas 12 kW de potência. Esta baixa potência devia-se à velocidade reduzida com que as pás giravam, o que se provava pouco eficiente. Mais tarde, em 1890, o dinamarquês Dane Poul La Cour descobriu que com menos pás no rotor a torre se tornava mais produtiva na geração de electricidade. A turbina que desenvolveu foi instalada em zonas rurais do seu país durante os anos seguintes (Danish Wind Industry Association, 2003).

Nos anos decorrentes, foram desenvolvidos e testados novos conceitos, como as torres com apenas duas pás e depois com três, pela companhia "F. L. Smidth". A maioria destas torres era em betão, mas nesta fase o maior interesse não se prendia com o material com que a torre era fabricada. Na Alemanha desenvolveram-se projectos megalómanos que nunca chegaram a ver a luz do dia, como o do engenheiro Hermann Honnef, com uma torre treliçada com 250 metros de altura e 5 rotores com 160 metros de diâmetro cada e potência de 20 MW (Hau, 2006).

Como o fornecimento de electricidade das zonas rurais já não apresentava um problema, na sequência do trabalho dos irmãos Marcellus e Joseph Jacobs que conseguiram comercializar milhares de torres desde 1,8 a 3 kW de potência pois apresentavam uma grande fiabilidade e baixa manutenção, foram feitos planos nos EUA para implantar grandes turbinas eólicas na rede pública. O americano Palmer Cosslett Putnam foi o primeiro a executar estes planos, tendo instalado, em 1941, a primeira grande turbina eólica, com uma altura de 35 metros e potência de 1,25 MW, sendo a torre com maior potência até 1979 (Johnson, 2001).

O preço da electricidade gerada por combustíveis fósseis foi decaindo, e tornou-se cada vez menos vantajoso apostar na energia eólica. Na sequência da crise de petróleo de 1973, que se traduziu num embargo total do envio de petróleo aos EUA e outras nações da Europa (incluindo Portugal), desencadeou-se nelas o debate sobre a sua dependência de combustíveis fósseis e estimulou-se o investimento público em programas de investigação e desenvolvimento no âmbito do aproveitamento da energia do vento para produção de electricidade. Um programa muito importante começou a ser desenvolvido nos EUA por parte da NASA e teve como primeiro resultado visível a instalação, em 1975, da primeira turbina eólica moderna, a MOD-0 (Figura 2-2), uma torre treliçada com 30 metros de altura, 100 kW

de potência e um rotor horizontal de duas pás com 38 metros de diâmetro (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).



Figura 2-2 - MOD-0 (Dodge, 2015).

O passo seguinte no desenvolvimento de turbinas de grandes dimensões deu-se com a instalação, em 1981, da torre MOD-2, com rotor de diâmetro de 91 metros e 2,5 MW de potência. Iniciaram-se por esta altura as primeiras cooperações entre empresas americanas e europeias, nomeadamente Suécia e Alemanha, resultando nos protótipos WTS-3 e WTS-75, que congregavam os mais recentes avanços tecnológicos (Hau, 2006).

Os resultados das investigações em protótipos de grandes dimensões possibilitaram o desenvolvimento da indústria eólica com torres mais pequenas. Assim, as primeiras turbinas eólicas comerciais foram instaladas no início dos anos 80 na Europa e EUA, com potências até 100 kW (Figura 2-3). O progresso desta indústria deve-se em grande parte ao incentivo e financiamento do estado da Califórnia que, conjuntamente com as velocidades de vento registadas, deu origem ao chamado *wind rush*, instalando-se milhares de torres e criando diversos parques eólicos (Manwell, McGowan, & Rogers, 2002). No início de 1987, cerca de 15000 torres com uma potência total de 1400 MW estavam instaladas na Califórnia.

A altura e potência das torres não mais pararam de crescer, comercializando-se actualmente estruturas com potência de 3,5 MW e altura superior a 100 metros e sempre com a perspectiva de aumentar.

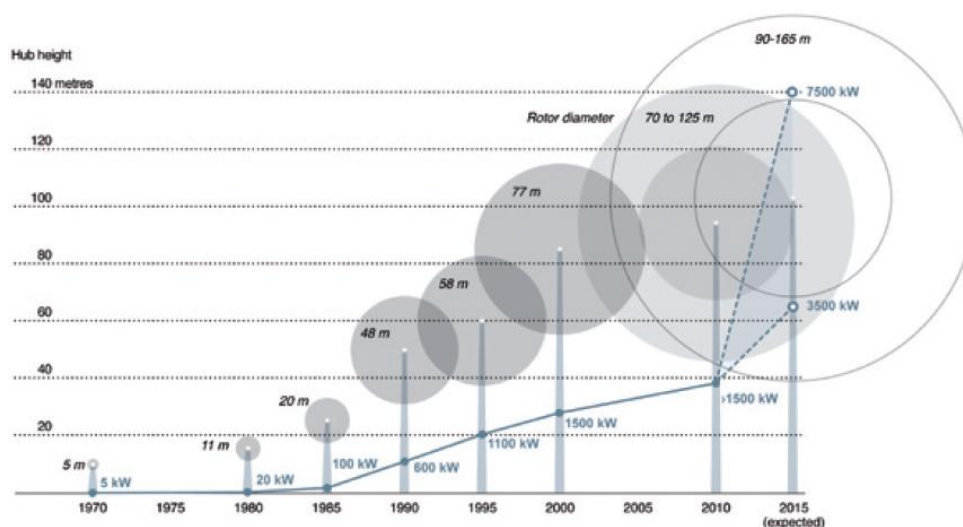


Figura 2-3 - Evolução da altura e potência das torres eólicas comerciais (Worldsteel Association).

Os programas de investigação resultaram numa certa estandardização do desenvolvimento tecnológico das turbinas eólicas, verificando-se o predomínio de certas soluções como eixo horizontal em detrimento do vertical, ou rotores de três pás em relação aos de duas (Castro, 2003). Estas soluções têm-se provado muito eficientes ao longo do tempo, assim como as torres em aço, que perfazem, como referido, mais de 90% das torres instaladas. No entanto, com o objectivo de aumentar o rendimento destas estruturas e construir em maior altura, assim como diminuir a emissão de gases nocivos durante o processo de fabrico, surge o interesse em estudar diferentes soluções, como as torres eólicas com painéis CLT.

## 2.2 A energia eólica no mundo

Apesar do avanço tecnológico registado, a energia eólica há 20 anos não tinha a preponderância de hoje. Todavia, em 1997, com o acordo do Protocolo de Quioto, definiram-se finalmente compromissos para a redução da emissão de gases nocivos para a atmosfera e propuseram-se acções a adoptar, entre as quais promover o uso de fontes energéticas renováveis, como a energia eólica. Ainda que este protocolo esteja longe de atingir o sucesso, já que a emissão de dióxido de carbono tem aumentado a nível global - de 23 mil milhões de toneladas em 1990 para 35 mil milhões em 2013 (Olivier, Janssens-Maenhout, Muntean, & Peters, 2014) - pois países como a China e a Índia, por exemplo, por serem países em desenvolvimento, não são obrigados a diminuir as emissões para a atmosfera, foi catalisador no investimento do sector das energias. De notar que a União Europeia representa apenas 11% das emissões mundiais de gases com efeito de estufa.

Desde então, verificou-se um aumento muito significativo do consumo de energia proveniente das energias renováveis e, progressivamente, uma diminuição na UE de instalações de tecnologias de petróleo e carvão. Desde 2000, a percentagem de novas capacidades instaladas de energias renováveis é superior a 50%. Em 2000, instalaram-se 3,6 GW de capacidade de energias renováveis que representavam 22,4% das novas capacidades instaladas na UE, aumentando para 21,3 GW em 2014, que representa 79,1%. No total, foram instalados 412,7 GW na UE desde o ano 2000, dos quais 29,4% provêm da energia do vento (Corbetta, Pineda, & Wilkes, 2015).

Na UE pretende-se reduzir em 40% as emissões de gases com efeito de estufa em 2030 relativamente aos valores de 1990; atingir, pelo menos, 27% de quota de consumo de energias renováveis e obter uma poupança energética de 30%, segundo o documento "Um quadro político para o clima e a energia no período de 2020 a 2030". Reforça-se o incentivo às energias renováveis para diminuir a dependência energética e reduzir as importações de combustíveis fósseis. Certos países têm estratégias energéticas mais ambiciosas, como é o caso da Dinamarca (país com maior percentagem de energia consumida proveniente da produção eólica: 39%), que para além de cumprir com as metas estipuladas pelo consenso europeu, pretende tornar-se independente das energias fósseis até 2050, desde electricidade e aquecimento a indústrias e transportes (The Danish Government, 2011).

A instalação de torres e parques eólicos tem aumentado em grande escala em todo o mundo, a que correspondeu em 2014 uma capacidade adicionada recorde de mais de 50 GW e uma taxa de crescimento de 16%. Particularizando, a China cresceu 25% mantendo-se como o maior investidor neste tipo de energia e o Brasil registou um aumento expressivo de 82% (World Wind Energy Association, 2014).

Durante o ano de 2014, a maior parcela de capacidade instalada na Europa pertenceu à energia eólica com 11,8 GW (43,7% do total na Europa) e no final do ano a capacidade instalada de energia eólica no mundo quase atingiu os 370 GW (Figura 2-4):



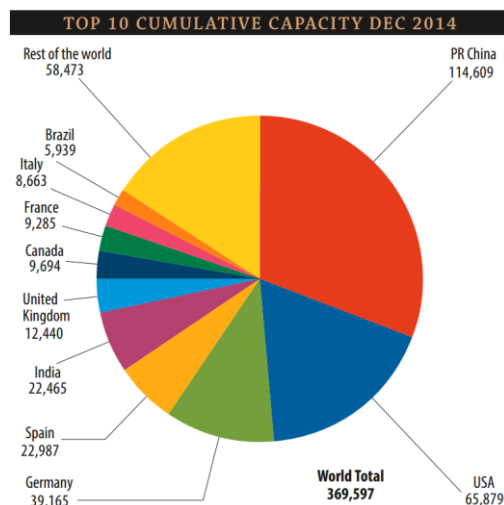


Figura 2-4 - Capacidade Instalada de Energia Eólica em GW (GWEC).

Em território nacional, no final de 2014, estavam instaladas cerca de 2500 torres eólicas, a que equivale uma potência instalada de, aproximadamente, 5 GW, um aumento de 4% face a 2013 (Figura 2-5). Com esta quantidade de equipamentos instalados, em 2014, a energia eólica teve uma contribuição de 24% no total de 63% de produção de eletricidade através de energias renováveis. No entanto, ao contrário da conjuntura mundial, em Portugal houve uma estagnação durante o ano transacto e no primeiro semestre de 2015, uma vez que existem menos locais com condições favoráveis à instalação de torres eólicas e que em 2013 houve uma revisão de políticas que pôs fim ao regime bonificado (INEGI, 2014).

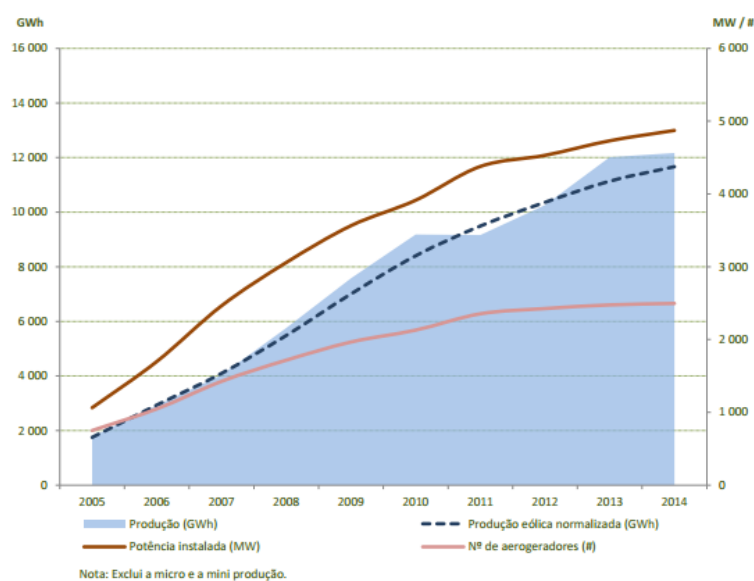


Figura 2-5 - Evolução da produção eólica e equipamentos instalados em Portugal (APREN).

Portugal investiu bastante na última década neste tipo de *energias alternativas* e é actualmente o sétimo país da Europa com mais potência instalada e o segundo país com maior percentagem de energia consumida proveniente da produção eólica (GWEC, 2015).

### 2.3 Classificação de torres eólicas

As torres eólicas, independentemente do material em que são fabricadas, são classificadas, por ser mais prático, de acordo com aspectos de design, nomeadamente o seu eixo de rotação: de eixo horizontal (HAWT - *Horizontal Axis Wind Turbine*), as mais usuais no mercado, ou de eixo vertical (VAWT - *Vertical Axis Wind Turbine*), como as duas que se instalaram recentemente na Torre Eiffel, em Paris.

As HAWT têm a vantagem de ter uma velocidade de arranque baixa e conseguirem controlar a velocidade de rotação rodando as pás segundo o seu eixo longitudinal, o que também permite protegê-las em casos de ventos extremos. As torres de eixo horizontal podem ser ainda classificadas segundo o número de pás (*single bladed*, *two bladed*, *three bladed* ou *multi bladed*) ou segundo o controlo aerodinâmico: controlo *stall* (pás do rotor segundo um determinado ângulo, mas travam se as velocidades do vento aumentarem em demasia), controlo *pitch* (pás do rotor rodam segundo o seu eixo longitudinal, adaptando a sua posição à direcção e intensidade do vento) ou controlo *active stall* (Danish Wind Industry Association, 2003).

As torres de eixo vertical, desenvolvidas por Darrieus nos anos 20, têm a vantagem de serem perpendiculares ao fluxo do vento em quase todas as direcções e por isso dispensam mecanismos de orientação. Outra grande vantagem é a instalação junto ao solo de todo o equipamento de conversão da energia, o que facilita a montagem e manutenção da torre. Uma das desvantagens é a incapacidade de se auto-iniciarem, sendo necessários mecanismos adicionais para o arranque (Mathew, 2006).

Os principais componentes de uma turbina eólica estão representados em esquema na Figura 2-6.

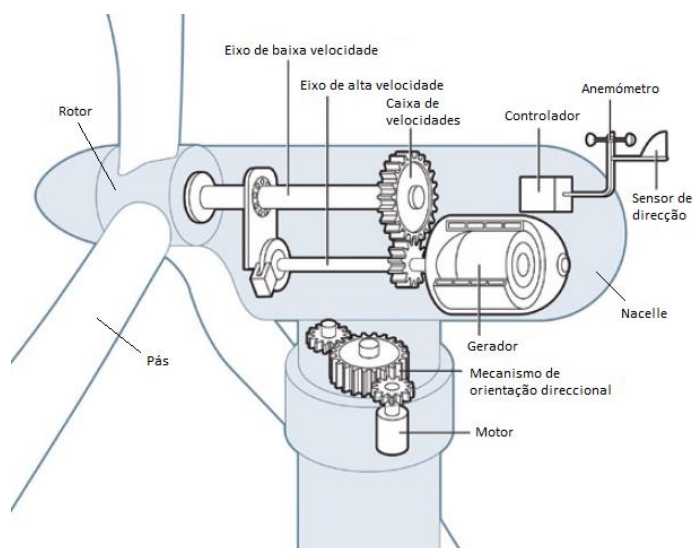


Figura 2-6 - Componentes de uma turbina eólica (Worldsteel Association).

De uma forma sucinta, as pás do rotor captam a energia do vento e convertem-na em energia rotacional no eixo que, por sua vez, transfere a energia para o gerador. A caixa de velocidades conecta o eixo de baixa velocidade com o de alta velocidade, e aumenta a velocidade rotacional até ao valor requerido pelo gerador. O gerador, através de electromagnetismo, converte a energia rotacional do eixo em energia eléctrica. Por fim, o gerador encontra-se ligado a um transformador instalado perto do solo, que converte a electricidade da turbina na tensão exigida pela rede eléctrica (Worldsteel Association, 2012).

O anemómetro e o sensor de direcção medem, respectivamente, a intensidade e a direcção do vento e transmitem essa informação ao controlador. O controlador comunica ao mecanismo de orientação direccional que adapta a posição da torre ao fluxo do vento e às pás do rotor que se orientam igualmente para a posição de melhor rendimento.

A *nacelle* é o invólucro que suporta a maioria dos componentes da turbina como se observa na figura anterior.

## 2.4 Tipos de torres eólicas e respectivos processos construtivos

A área da tecnologia da energia eólica tem evoluído bastante ao longo dos últimos anos e, como tal, existem inúmeras soluções disponíveis de torres eólicas no mercado. A grande variedade de alternativas deve-se ao facto de umas apresentarem custos associados mais reduzidos, outras possibilitarem maiores alturas que permitam aumentar o rendimento, ou ainda diminuir o impacte ambiental na produção e montagem da torre.

Os tipos de torres eólicas que se consideram pertinentes de analisar são os seguintes:

- Torres em aço soldado transversal e longitudinalmente com flanges
- Torres de aço aparafusadas
- Torres em betão
- Torres híbridas aço/betão
- Torres treliçadas
- Torres em madeira

#### 2.4.1 Torres em aço soldado

As torres em aço soldado transversal e longitudinalmente com flanges são as mais usadas no mercado actual, perfazendo cerca de 90% do total de torres instaladas. A torre é constituída por chapas de aço com uma espessura entre 10 e 50 milímetros (dependendo do *design* da torre e diminuindo ao longo da altura) e comprimento de 2 metros dobradas e soldadas longitudinalmente. As placas são dobradas aplicando-lhes uma pressão através de *steel rollers* (laminadores), garantindo uma pressão maior numa das extremidades das placas para assegurar a forma cónica da torre, como é ilustrado na Figura 2-7 (Hau, 2006).



Figura 2-7 - Chapas de aço a tomarem forma cónica (Wind Power Engineering & Development, 2015).

Ao alargar a base da estrutura e dando-lhe uma forma cónica, consegue obter-se a rigidez exigida com uma massa total reduzida, o que traz vantagens óbvias a nível económico (Hau, 2006). Para além disso, a forma afunilada da torre reduz o momento actuante produzido pelo rotor e pás sobre o corpo da torre. O aumento do diâmetro na base permite uma diminuição da espessura do aço, aumentando dessa forma a resistência à tracção, mas diminuindo a resistência à encurvadura.

No entanto, estas torres estão limitadas a um diâmetro máximo de 4,5 metros na base e 30 metros de comprimento por secção, devido a restrições de transporte, como a altura de obras de arte ou outros obstáculos. Esta limitação implica uma altura máxima e peso total da estrutura. Como tal, este tipo de torre torna-se pouco económico a partir de, sensivelmente, 100 metros de altura pois, devido ao aumento da espessura das paredes, existem soluções menos dispendiosas (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Para alturas superiores, como existe um diâmetro máximo, a espessura requerida para o aço ultrapassa os 40 mm e torna-se necessário usar máquinas especiais para dobrar as chapas de aço (Hau, 2006).

Várias chapas de aço - entre 8 e 15 - são soldadas transversalmente formando uma secção da torre (Figura 2-8), sendo o tipo de soldagem mais comum a soldagem por arco submerso (SAW - *submerged arc welding*), testando-se métodos mais rápidos e menos dispendiosos, sem comprometer a resistência da soldadura, como a soldagem por feixe de electrões em vácuo (Schaumann & Collmann, 2013). Numa torre em aço soldado, as soldaduras são pontos críticos da estrutura devido à acção dinâmica do vento.

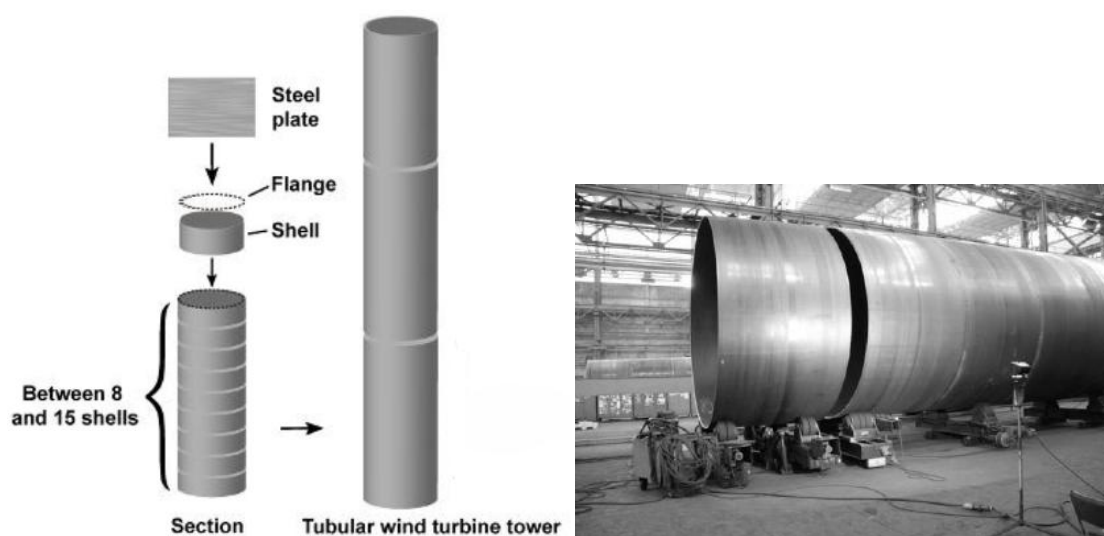


Figura 2-8 - Secção de uma turbina eólica (Schaumann & Collmann, 2013).

Em cada extremidade da secção é soldada uma flange em L que, posteriormente, serve para aparafusar duas secções na montagem da torre. O tipo de flange usado no aparafusamento entre secções permite que este seja feito pelo interior da torre, não havendo necessidade de uma estrutura exterior para o auxílio deste trabalho. A flange inferior da torre é ligada à fundação, enquanto a flange superior é aparafusada à *nacelle*.

Antes de transportar a torre por secção para o local da construção, trata-se do seu revestimento. É feita inicialmente uma decapagem para remover contaminantes e limpar a superfície para garantir a aderência suficiente do revestimento. Para proteger o aço do ambiente envolvente, é aplicada à torre um revestimento de zinco para prevenir a sua corrosão. Finalmente aplicam-se duas ou três demãos com a cor pretendida (sendo o branco ou o cinzento claro as cores usuais em Portugal). As tintas aplicadas não devem possuir brilho, de forma a evitar demasiados reflexos (Hau, 2006).

Estas secções são transportadas para o local de montagem da torre, assim como as pás do rotor e a *nacelle*. É um processo que requer planeamento, pois são necessários veículos especiais devido ao comprimento das secções e dos elementos e, para além disso, a maioria das torres são construídas em locais de difícil acesso, sendo transportadas por estradas montanhosas e sinuosas, atravessando aldeias, pontes e viadutos, o que requer manobras precisas e, por vezes, o auxílio de gruas em manobras mais exigentes (Figura 2-9).



Figura 2-9 - Transporte de uma pá (Wind Technologies, 2011).

No local da obra, depois de nivelado o terreno, realiza-se a fundação em betão. A solução mais comum e económica é a fundação superficial em betão armado, utilizada sempre que o solo perto da superfície apresente boa capacidade de suporte e por ser tecnologicamente pouco exigente. Em solos de fraca qualidade, em zonas de espaço limitado, em terreno inclinado, ou em fundações *off-shore* é inevitável recorrer a outras opções como as fundações por estacas ou em caixão (LaNier, 2005).

A forma ideal de uma fundação deste tipo é um círculo (em plano), pois o dimensionamento da fundação é condicionado pelo momento de derrube na base da torre em situações de carga extrema, que inclui a acção do vento segundo qualquer direcção. Devido às dificuldades em

realizar uma cofragem circular, é comum realizar-se numa forma octogonal ou hexagonal (LaNier, 2005).

A ligação entre a torre eólica e a fundação é uma componente muito importante pois é neste ponto que se transferem as elevadas cargas da torre para a fundação. Esta ligação pode ser realizada de inúmeras formas: uma solução é colocar um cilindro de aço até à base da fundação sobre o qual irá apoiar a torre e transferir as cargas - Figura 2-10, à esquerda; outra é ancorar parafusos à base da fundação e no topo colocar uma flange para aparafusar à torre - Figura 2-10, à direita (Hassanzadeh, 2012).



Figura 2-10 - Tipos de ligação entre a torre e a fundação (Training Course, 2011).

A assemblagem da torre é feita por elevação das várias secções com recurso a uma das seguintes máquinas:

- Grua telescópica
- Torres de Elevação

A primeira é mais comum, variando na sua capacidade máxima dependendo da altura da torre ou do material utilizado, isto é, se o material é mais ou menos leve. É a solução mais económica mas tem a desvantagem de necessitar de uma grande largura para se deslocar, sendo por vezes preferível desmontá-la, movê-la e montá-la de novo na construção de torres sucessivamente; também tem a restrição do vento, não podendo ser utilizada com ventos fortes.

As torres de elevação (Figura 2-11) são usadas principalmente quando as condições atmosféricas são adversas (ventos até 18 m/s) ou a altura da torre e peso assim o exigem. É



uma solução dispendiosa comparando com as gruas móveis (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).



Figura 2-11 - Torre de elevação (Engström et al, 2010).

Na figura anterior pode observar-se a elevação de uma secção da torre que será aparafusada à parte já montada através de flanges em L. A zona de ligação das secções é também um plano sensível da estrutura, devendo-se garantir a máxima durabilidade dos parafusos à fadiga. Um dos problemas mais comuns verificados em torres deste tipo é a perda de tensão dos parafusos ao longo do tempo.

Por fim eleva-se a *nacelle* e as pás (separadamente ou em conjunto depois de montadas no solo) e fazem-se as instalações eléctricas necessárias.

#### 2.4.2 Torres em aço aparafusado

Com o objectivo de melhorar o comportamento à fadiga das torres eólicas e diminuir os custos de produção, surge uma solução inovadora que substitui as flanges em L na ligação entre as secções da torre. As flanges apresentam uma espessura elevada (por vezes superior a 20 cm) e o processo de fabrico é moroso e dispendioso; nesta configuração a complexidade diminui. Nesta solução a secção inferior da torre tem aberturas compridas que permitem que os parafusos instalados na secção superior em orifícios normais possam ser encaixados e aparafusados de uma forma simples pelo interior da torre (Figura 2-12). Os parafusos são pré-esforçados, exercendo uma pressão de contacto entre as chapas que faz aumentar a resistência por atrito. O aparafusamento das secções é um processo realizado *in-situ*.



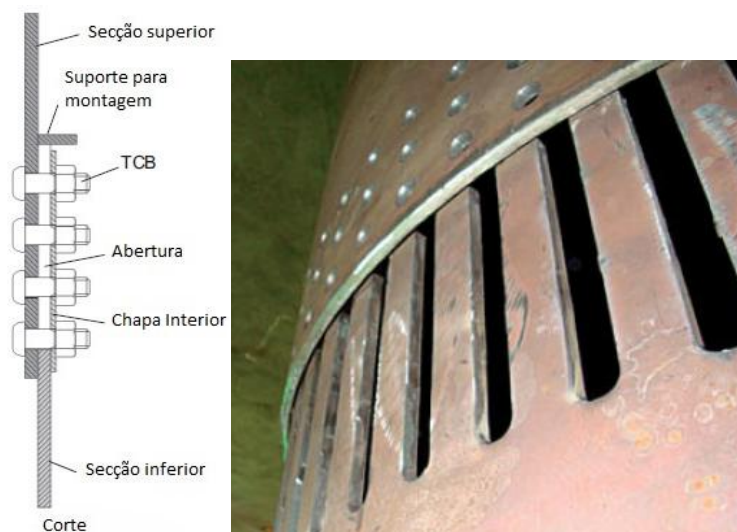


Figura 2-12 - Pormenor da ligação numa torre sem soldaduras (Veljkovic, et al., 2010).

A característica mais importante para qualquer ligação por atrito é a perda de tensão durante o tempo de vida útil da torre, que depende do tipo do parafuso, processo de tensão, acabamento das superfícies ligadas, geometria da ligação e carregamento solicitado (Veljkovic, et al., 2010). Assim, nesta ligação utilizam-se parafusos TCB (*Tension Control Bolts*), que são mais rápidos a instalar e, como o aperto é feito apenas numa extremidade do parafuso, reduz-se o risco de perda de tensão (Veljkovic & Husson, 2009). É ainda considerada uma chapa no interior da ligação, pois verificou-se em estudos uma diminuição da resistência com a remoção de material em volta do parafuso (como acontece no caso das aberturas compridas na ligação). A chapa é colocada para evitar este problema e providenciar uma maior área de contacto na ligação (Kulak, Fisher, & Struik, 2001).

Outro conceito de torres deste tipo, como é exemplo a *Northstar Modular Tower*, substitui, para além das flanges em L, as soldaduras longitudinais dos painéis que compõem as secções da torre por ligações aparafusadas. Com esta configuração retira-se na totalidade a soldadura na construção da torre melhorando a sua resistência à fadiga. Os painéis são transportados separadamente, sendo a montagem das secções feita no local da obra, o que possibilita produzir torres com uma altura superior a 100 metros, pois não existe a restrição dos 4,5 metros de diâmetro da torre na base durante o transporte (NorthstarWind, 2015).

### 2.4.3 Torres em betão

Apesar de, actualmente, não ser tão utilizado como o aço, o betão tem a vantagem de permitir construir torres de altura superior a 100 metros sem a restrição do transporte com as técnicas adequadas. Existem vários tipos de construção de torres em betão: com cofragem deslizante e betonagem *in-situ*, a partir de elementos pré-fabricados ou uma conjugação dos dois, ou seja,

ter na base maiores diâmetros com a betonagem *in-situ* e nas secções superiores usarem-se os elementos pré-fabricados, quando o diâmetro da torre já não apresentar impedimentos ao transporte (Hau, 2006).

Numa torre de betão, o betão apresenta elevada resistência à compressão, enquanto que a capacidade de resistir à tracção é assegurada pelo aço localizado dentro das paredes da torre (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). As torres podem ser dotadas de cabos de pré-esforço o que melhora o seu comportamento à fadiga e diminui o risco de aparecimento de fissuras (LaNier, 2005) e é um meio simples de unificar os elementos pré-fabricados para que a torre aja como uma estrutura monolítica (Tricklebank, Halberstadt, & Magee).

A construção por cofragem deslizante é um processo diário de 24 horas com um ritmo de produção entre quatro a seis metros por dia, o que o torna num método demorado. A cofragem da torre vai subindo à medida que a betonagem é feita. Como o endurecimento do betão depende da temperatura, não é possível trabalhar em condições atmosféricas adversas. Tem a vantagem de não ser necessária uma grua de grandes dimensões para a assemblagem do corpo da torre, mas é inevitável uma máquina de elevação para posicionar a *nacelle* e o rotor. Não é uma solução económica para a instalação de poucas turbinas eólicas.

A construção por elementos pré-fabricados é mais célere. As unidades pré-fabricadas são transportadas para o local da obra como elementos circulares inteiros (para as zonas da torre com diâmetros menores e cujo transporte rodoviário não apresente contrapartidas) ou em segmentos para os diâmetros maiores, que serão posteriormente ligados para formar um elemento circular completo a instalar na torre. Montam-se no máximo quatro elementos no solo (cerca de 12 metros de altura), aplica-se tensão na secção para esta se manter conexa e eleva-se com o auxílio de uma grua. Os elementos pré-fabricados podem ter várias formas, dependendo do fabricante, podendo ser "painéis curvos" em betão até 20 metros de comprimento. Na figura 2-13 podem observar-se dois tipos de elementos pré-fabricados em betão.



Figura 2-13 - Construção de torre em betão com elementos pré-fabricados (INNEO - Precast Concrete Wind Towers, 2008).

À medida que as secções vão sendo erigidas são tensionadas com parafusos compridos ou cabos de aço à secção imediatamente abaixo ou com cabos de aço a provir da ancoragem na base, proporcionando estabilidade a curto prazo durante a construção da estrutura e também melhoria na sua resistência final (Tricklebank, Halberstadt, & Magee).

As torres em betão necessitam de pouca manutenção: este material mantém as suas propriedades em condições de exposição extrema e não se verificam os problemas de outras torres com soldaduras e juntas aparafusadas. Estas estruturas podem atingir os 50 anos de tempo útil de vida (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).

#### 2.4.4 Torres híbridas aço/betão

As torres híbridas de aço e betão (Figura 2-14) são uma opção económica para torres de altura superior a 100 metros, o que se traduz numa melhoria significativa na produção de energia. A torre é composta por uma parte inferior em betão, que pode ser betonada *in-situ* ou formada por elementos pré-moldados, como visto na secção 2.4.3, e uma torre convencional em aço no topo. Aproveitando-se as melhores características de cada material, recorre-se ao betão na base para possibilitar maior diâmetro (e, conseqüentemente, maior altura) e na parte superior um material mais leve (aço), onde o diâmetro da secção já não é impeditivo ao transporte.

Neste tipo de torres há transferências consideráveis de momentos flectores na secção de transição entre os dois materiais, instalando-se, portanto, um anel em aço endurecido que seja rígido o suficiente para evitar elevada concentração de cargas no betão. Esta ligação é aparafusada a uma flange metálica colocada na base da secção de aço e segura ao betão pelos cabos de aço no interior do betão (LaNier, 2005).



Figura 2-14 - Torre híbrida aço/betão (Reve, 2015).

#### 2.4.5 Torres treliçadas

Nos anos iniciais da utilização da energia eólica, as torres eólicas treliçadas eram usadas em pequenas turbinas. Actualmente, o interesse por esta configuração reapareceu em torres de alturas superiores a 100 metros. A estrutura é consideravelmente mais leve que os restantes sistemas estruturais, sendo 40% mais leve que as torres tubulares em aço (Hau, 2006).

Por razões de transporte, como sucede em todas as soluções excepto as torres em aço, estas estruturas ao serem transportadas desmontadas permitem construir torres eólicas com *qualquer* diâmetro pretendido. Os elementos da torre são soldados ou aparafusados em obra, e por esse motivo, a duração da montagem é maior. Numa torre da Fuhrländer, com uma altura de 141 metros, usaram-se cerca de 13000 parafusos (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Também necessitam de manutenção mais regular (o que implica maiores custos), pois os parafusos estão expostos ao ar livre e há a possibilidade de intempéries danificarem esses ligadores. Um aspecto positivo é a sua transparência visual, que pode ser considerado mais atractivo a longas distâncias, e reflectem menos luz que as torres em aço (Hau, 2006).

O processo habitual de montagem da torre é aparafusar (ou soldar) todos os elementos com a torre na horizontal, pousada no terreno, e só depois elevá-la, o que implica uma área tão larga quanto a altura da torre (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).

#### 2.4.6 Torres em madeira

As torres eólicas em madeira estão em estudo há relativamente pouco tempo, sendo que a primeira torre erigida neste material está em funcionamento apenas desde 2012, em Hannover, e tem 100 metros de altura e uma potência de 1,5 MW. A empresa responsável é a *TimberTower*, que se encontra a desenvolver uma torre com 140 metros de altura, de 2,5 MW.

A torre de madeira é oca e de secção octogonal (ou dodecagonal para a torre em desenvolvimento) tendo na base uma área de, aproximadamente, 35 m<sup>2</sup>, o que é consideravelmente superior às torres convencionais em aço. É composta por 54 painéis de madeira lamelada colada cruzada com dimensões desde 15x2,72 metros na base até 3,75x1,18 metros no topo. Este material é muito competitivo pois tem a vantagem de não ser necessário transporte especial já que os painéis são transportados separadamente possibilitando assim a construção de torres de altura assinalável. A torre em desenvolvimento, com um rotor com 140 metros de diâmetro, terá uma altura total de 196 metros (TimberTower, 2014).

Para além disso, é um material que apresenta inúmeros benefícios na construção deste tipo de estruturas: é um material resistente à fadiga, à encurvadura e ao fogo (FPInnovations, 2013). É um material totalmente reciclável, os gastos de energia exigidos são inferiores aos necessários na produção de aço ou betão, é fácil de processar e as torres em CLT têm um tempo de vida útil de 40 anos (TimberTower, 2014).

A estrutura é composta por uma fundação em betão, tal como nas restantes torres descritas anteriormente. Para a sua montagem é usada uma estrutura de madeira pré-fabricada no centro da torre desde a base até à *nacelle*, o cimbriço, e os painéis são colocados numa sequência helicoidal, desde a base até ao topo, com o recurso a uma grua de grandes dimensões (Figura 2-15). O cimbriço não só auxilia na montagem, como na manutenção ao longo da vida útil, e inclui escadas, plataformas de trabalho e passagens para todos os cabos eléctricos.



Figura 2-15 - Montagem da torre (TimberTower, 2014).

Para tornar a torre numa estrutura monolítica é necessário colocar chapas de aço para ligar os painéis transversalmente uns aos outros e à fundação para transferir as forças até ao solo. Um pormenor dos cortes longitudinais na madeira para introdução das chapas de aço perfuradas

está representado na Figura 2-16. Por fim, para ligar a torre ao rotor é necessário um adaptador em aço (TimberTower, 2014).

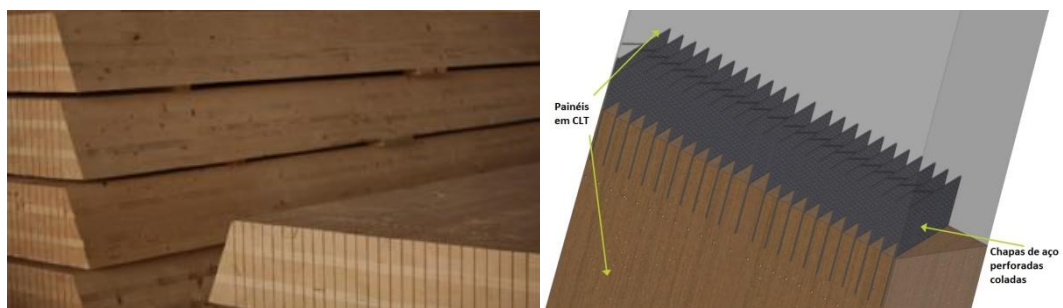


Figura 2-16 - Pormenor de cortes na madeira para introdução das chapas de aço (TimberTower, 2014).

## 3 FUNCIONAMENTO E MONTAGEM DA TORRE EM CLT

### 3.1 Ligação entre painéis em CLT

A torre eólica em madeira lamelada colada cruzada que se pretende estudar apresenta uma secção transversal hexagonal oca (sem cimbri), composta por 6 painéis planos cortados em bisel em ângulos de 30° de modo a, uma vez justapostos, formarem uma secção fechada com juntas perfeitamente ajustadas. A secção da torre que se pretende avaliar é composta por painéis com 1,20 metros no lado exterior, 1,10 metros no lado interior, 2,60 metros de altura e 10 cm de espessura. Estas dimensões correspondem a cerca de 1/3 das que constituiriam a base de uma torre eólica em CLT com 80 metros de altura.

Apesar de se ter em perspectiva a montagem de uma torre com uma secção octogonal oca, tendo já sido realizado um primeiro estudo de viabilidade (Ventura, 2015), os resultados esperados com um ensaio numa torre hexagonal são possíveis de extrapolar para a solução que se pretende adoptar, havendo uma economia de material (menos painéis e menos desviadores) e de espaço a ocupar durante o ensaio. O principal objectivo é estudar a ligação entre os painéis, e isso tanto é possível para uma secção com 4, 6, 8 ou mais painéis.

Pretende-se que este sistema não tenha qualquer estrutura de suporte interior, ao contrário do que sucede na torre da TimberTower (TimberTower, 2014), excepto uma escada de acesso ao topo apoiada em plataformas metálicas igualmente espaçadas ao longo da altura que permitam realizar a manutenção necessária ao longo do tempo de vida útil da torre. Para que tal seja exequível, idealizou-se um sistema de aperto pelo interior da torre, que comprime os painéis CLT uns contra os outros, formando secções compactas e monolíticas, que funcionem como um corpo rígido.

Para a realização desse aperto idealizou-se uma solução constituída por dois sistemas de ligação entre os painéis:

- 6 cabos de aço perimetrais em um ou mais níveis entre plataformas traccionados por esticadores
- 6 tirantes (varões roscados) perimetrais, nas zonas das plataformas metálicas

O estudo do segundo tipo de ligação é objecto de uma dissertação paralela a este trabalho, pelo que não se adiantarão detalhes sobre o mesmo.

A presente dissertação pretende estudar o primeiro sistema que é constituído, como referido, por um conjunto de cabos de aço perimetrais, paralelos entre si, localizados no interior da estrutura. Não sendo obrigatório, o número de cabos é preferencialmente igual ao número de lados do polígono da secção transversal, para que cada um tenha o respectivo esticador num lado diferente, minimizando assim as assimetrias causadas por perdas por atrito nos desviadores. No entanto, por razões de simplificação no fabrico dos desviadores, foram considerados apenas 3 e não 6 cabos no protótipo ensaiado. Está igualmente em estudo o espaçamento deste sistema de ligação, de forma a mobilizar suficiente atrito nas juntas verticais entre painéis para impedir o seu escorregamento e suportar as tensões de corte existentes, assegurando assim o comportamento monolítico da secção. Este tópico, no entanto, é igualmente desenvolvido na dissertação paralela a esta. A cada cabo será aplicado um esforço de tracção com recurso a esticadores (um por cabo) e, através de desviadores em aço instalados entre as juntas dos painéis, será desviada a força dos cabos para os painéis que exercerão uma força de compressão entre eles, o que os manterá na posição pretendida.

Na Figura 3-1 encontram-se esquematizadas as forças envolvidas no desviador e na ancoragem de madeira, quando aplicada, em cada um dos 3 cabos, uma força genérica,  $F$ .

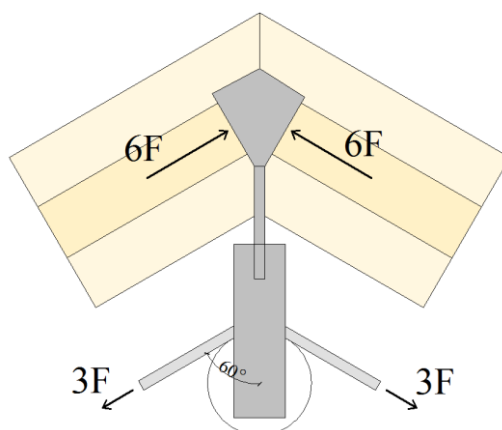


Figura 3-1 - Diagrama com as forças envolvidas no sistema.

O material utilizado, madeira lamelada colada cruzada, é obtido por colagem de um número ímpar de lamelas com espessuras entre 16 e 51 mm, com a orientação das fibras perpendiculares entre si e coladas sob pressão (FPInnovations, 2013). A madeira utilizada no ensaio, fornecida pela KLH, é da espécie espruce e tem as propriedades mecânicas referidas no Quadro 3-1:



Quadro 3-1 - Propriedades mecânicas do CLT (KLH UK, 2014).

Propriedades Mecânicas do CLT			
Flexão	$f_{m,k}$	24	MPa
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	16,5	MPa
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,12	MPa
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0,k}$	24	MPa
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	2,7	MPa
Corte	$f_{v,k}$	2,7	MPa
Módulo Elasticidade Paralelo (Médio)	$E_{0,mean}$	12000	MPa
Módulo Elasticidade Perpendicular	$E_{90,mean}$	370	MPa
Módulo de Distorção perpendicular às fibras (Médio)	$G_{90,mean}$	50	MPa
Massa Volúmica	$\rho_k$	400	kg/m <sup>3</sup>

Cada painel é composto por 3 lamelas, as duas exteriores com fio vertical e a interior com fio horizontal. Na Figura 3-2 apresenta-se um esquema das ancoragens na madeira:

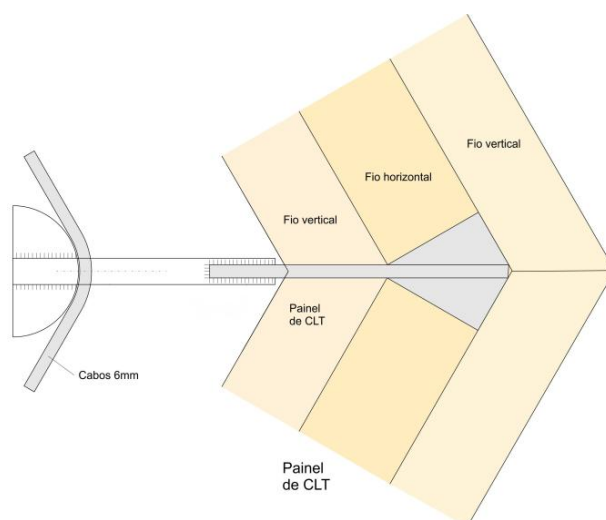


Figura 3-2 - Esquema das ancoragens (imagem cedida pelo Prof. João Negrão).

As ancoragens devem ficar centradas nos painéis de CLT, em contacto com a lamela com fio horizontal, garantindo assim que o esforço de compressão é exercido segundo a direcção a qual a madeira apresenta maior resistência à compressão (e maior rigidez), isto é, paralela ao fio (24 MPa). Este valor compara com o de 2,7 MPa da resistência à compressão perpendicular ao fio, que deveria ser considerado se a ancoragem fosse feita nas lamelas externas. Nas Figuras 3-3 e 3-4 pode observar-se um dos desviadores em aço a utilizar na secção da torre eólica.



Figura 3-3 - Vista lateral de um desviador.



Figura 3-4 - Vista superior de um desviador.

O desviador é produzido em aço e é composto por três roldanas nas quais são desviados os cabos. Cada uma dessas roldanas está ligada a duas hastes paralelas através de um veio individual soldado. Assim, cada cabo irá apenas transmitir esforços à roldana (e hastes) com a qual está em contacto.

É importante notar que as secções dos materiais que se utilizam no ensaio do segmento da torre eólica não são os mesmos a utilizar caso se pretenda erigir uma turbina em dimensões reais. A secção de CLT considerada neste trabalho poderia, numa torre real, corresponder a uma secção situada perto do topo, na medida em que a torre estreita em direcção ao topo e a secção a ensaiar é relativamente pequena, e a espessura das paredes reduz-se com a altura. Na base de uma torre real, e dependendo da altura e localização, a secção teria um diâmetro circunscrito muito superior - de, aproximadamente, 7 a 8 metros - e uma espessura na gama de 20 a 30 cm, composta por painéis com 5 (Figura 3-5) a 7 lamelas. Ao contrário do diâmetro, que teria uma variação contínua ao longo da altura, conseguida pelo corte trapezoidal dos painéis de CLT, a espessura variaria de forma descontínua, sendo assim necessário reflectir sobre o modo de resolver a transição entre painéis de espessuras diferentes.

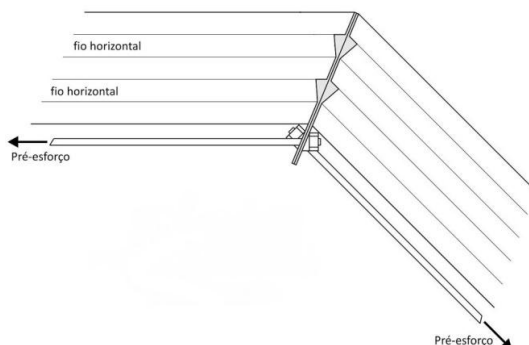


Figura 3-5 - Esquema de ancoragem em painel com 5 lamelas (imagem cedida pelo Prof. João Negrão).

Para painéis com mais lamelas os desviadores poderão ter de ser diferentes, como por exemplo se vê na figura anterior, exercendo pressão na madeira em duas áreas distintas - nos dois fios horizontais - comprimindo os painéis da mesma forma, mas com uma força superior para compensar a sua maior massa. Com o aumento da massa da estrutura, os 6 cabos teriam de aplicar uma força superior para conseguir comprimir os painéis, pelo que poderiam não suportar o aperto necessário, e tendo de se aumentar a respectiva secção.

A espaçamentos regulares haverá plataformas metálicas (Figura 3-6). Estes elementos desempenham múltiplas funções, estruturais e de serviço: a) funcionam como diafragmas rígidos no seu plano, uniformizando os deslocamentos horizontais e contribuindo para a distribuição das forças do vento pela secção transversal; b) impedem a formação de mecanismos resultantes da deformação por achatamento da secção transversal poligonal, que não seriam prevenidos pelo pré-esforço perimetral; c) funcionam como plataforma de trabalho para realizar a habitual manutenção a que a torre está sujeita durante o seu tempo útil de vida; d) funcionam como plataforma de apoio do sistema de elevação interno usado para a construção da torre.

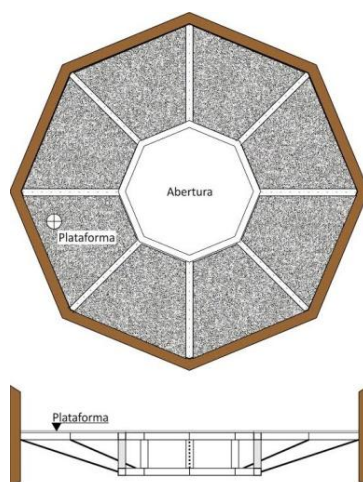


Figura 3-6 - Plataforma metálica (imagem cedida pelo Prof. João Negrão).

### 3.2 Montagem da Torre

A montagem com painéis em lamelado colado cruzado é feita por recurso a um sistema elevatório funcionando pelo interior. Os painéis têm forma trapezoidal, para que da sua montagem resulte o volume tronco cónico pretendido. As juntas transversais são desfasadas, nunca coincidindo num mesmo plano de corte. Esta disposição evita secções fracas, repartindo as juntas entre painéis por toda a superfície da torre, o que melhora o comportamento sob acções horizontais. Além disso, facilita o avanço do processo construtivo. Prevê-se a utilização de um método elevatório que não requeira uma grua de grandes dimensões para a ascensão dos painéis de madeira, elevando-se os painéis pelo interior da torre (Figura 3-7). No entanto, tal como sucede nas torres em betão por cofragem deslizante, como discutido no Capítulo 2, este método não é viável na elevação da *nacelle* e do rotor e é necessário uma máquina de grande porte para a instalação destas componentes, o que se torna pouco económico. Evita-se, no entanto, a estrutura de suporte no interior da torre utilizada pela *TimberTower* (TimberTower, 2014). Por razões de protecção de propriedade intelectual, devido a um pedido de patente em curso, não serão fornecidos pormenores adicionais relativos a este sistema.

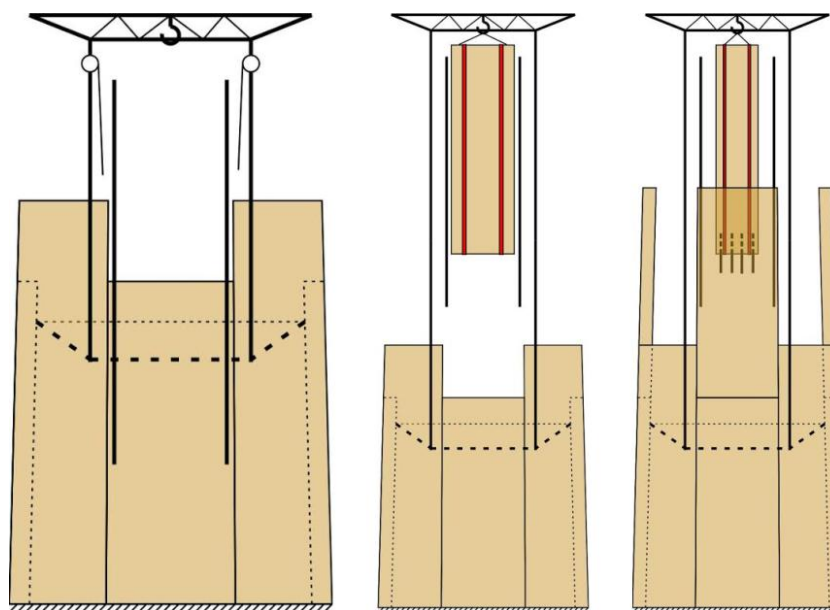


Figura 3-7 - Sequência de montagem (imagem cedida pelo Prof. João Negrão).

## 4 METODOLOGIA DE ENSAIO E ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

### 4.1 Objectivo

Os ensaios realizados têm como objectivo estudar a ligação entre os painéis de madeira lamelada cruzada que constituem a torre eólica e analisar a viabilidade da sua aplicação na construção de uma estrutura deste tipo. Pretende-se, num primeiro ensaio, avaliar apenas uma ligação com desviadores entre duas secções de madeira e, no final, montar uma aduela da torre eólica em CLT e avaliar a interacção entre as tensões nos desviadores de acordo com a força de tracção aplicada nos cabos de aço.

### 4.2 Ensaio preambular

Antes de erguer a aduela da torre eólica, preparou-se um *layout* para ensaiar uma ligação com um desviador entre duas secções de madeira, composto por dois perfis U e um varão roscado, de acordo com o *setup* representado na Figura 4-1. Os perfis são articulados num extremo e ligados por um varão roscado no oposto. Deste modo, pode variar-se a abertura angular e testar ângulos de desvio de 135°, que ocorrem em octógonos, ou de 120°, para hexágonos, caso do protótipo montado no presente trabalho. O recurso a este ensaio preliminar teve como objectivo confirmar a exequibilidade do sistema de pré-esforço proposto antes de se avançar para a produção dos 6 desviadores necessários e para a montagem da aduela que, pela sua dimensão e peso, exigia a disponibilidade de recursos humanos e meios mecânicos de elevação significativos. Uma vez que se procura, com este ensaio, avaliar apenas a reacção da madeira à tracção nos cabos de aço, sendo a força aplicada bastante inferior à resistência à compressão paralela às fibras de madeira, a dimensão e qualidade das peças de madeira utilizadas não é um elemento fundamental. Por isso, as peças de madeira utilizadas foram obtidas de barrotes 100x100mm<sup>2</sup> de madeira maciça de pinho bravo, adquirida a um fornecedor local e depois cortada, no laboratório, a um ângulo de 45°. A madeira não foi classificada, por tal ser desnecessário, mas tratava-se de barrotes de boa qualidade, sem defeitos significativos. Na Figura 4-2 observa-se o ensaio realizado.

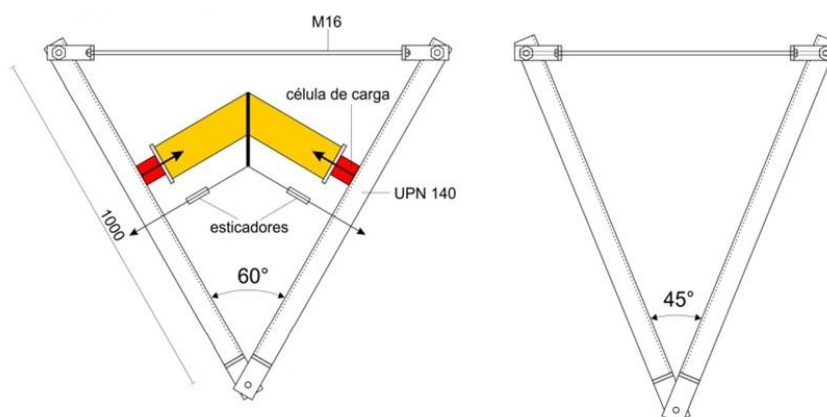


Figura 4-1 - Setup do ensaio preliminar (imagem cedida pelo Prof. João Negrão).



Figura 4-2 - Ensaio de uma ligação entre duas secções de madeira.

Foi aplicada uma força de, sensivelmente, 500 kg por cabo, paralelamente ao eixo longitudinal das peças. Os cabos de aço, de 6mm de diâmetro nominal, foram adquiridos num comerciante local e, segundo as especificações dele obtidas, tinham uma tensão última de tracção de 1770 MPa e um módulo de elasticidade de 62 GPa ( $6300 \text{ kp/mm}^2$ ) (Certex, 2014). Não se pretendia levar nenhum dos cabos à rotura, mas tão só verificar se a distribuição de forças de desvio e de ancoragem estavam em conformidade com os valores correspondentes ao polígono de forças da Estática e se havia perdas diferidas significativas. As dúvidas a este respeito resultavam da incerteza quanto à quantificação do atrito dos cabos nos desviadores, que podiam originar perda de tensão no ramo passivo (oposto ao do macaco hidráulico) e consequente desenvolvimento de flexão lateral do desviador. Usaram-se apenas dois cabos, para facilitar a instrumentação. Os macacos hidráulicos, que têm a mesma função dos esticadores, traccionam os cabos de aço e estes, por seu turno, traccionam também o desviador, sendo a força neste equilibrada pela compressão das cunhas de ancoragem contra as peças de madeira - o mesmo princípio que se irá aplicar na torre eólica em CLT, com os painéis a exercer compressão uns sobre os outros.

Na extremidade de cada secção de madeira colocou-se uma célula de carga de 5 tf (da "Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.") destinada a medir a força aplicada na madeira. No caso de paralelismo perfeito entre os dois ramos de cabo e a peça de madeira adjacente, do mesmo lado do desviador, esta deveria ser igual à soma da força aplicada em cada cabo. Apenas com estas células de carga seria difícil garantir durante o ensaio a aplicação da mesma força em cada cabo, já que é um processo manual e não se tem essa sensibilidade. Então colocou-se, associada a cada macaco hidráulico, uma célula de carga de 10 tf (da mesma marca) que indicava a força no cabo ao longo do tempo. Usaram-se as células de carga à disposição, não tendo nenhuma importância as suas capacidades máximas, uma vez que as forças aplicadas têm uma ordem de grandeza muito inferior.

Ligaram-se as células de carga ao equipamento de medição, Data Logger TDS-530, e aplicou-se força sucessivamente em cada cabo até atingir o valor pretendido (500 kg, como referido) e registaram-se os valores das forças nos cabos e na madeira ao longo de vários dias. A qualidade dos resultados foi comprometida pela dificuldade em manter o paralelismo dos cabos e da madeira, já que o manuseamento dos macacos, devido ao comprimento curto dos ramos de cabo, originava deslocamentos espúrios que tinham efeito significativo na geometria do sistema. Embora o ensaio seja genericamente simples, haverá que repensar o modo de aplicação da força, nomeadamente utilizando ramos mais longos. A Figura 4-3 mostra um pormenor da ligação com um desviador.

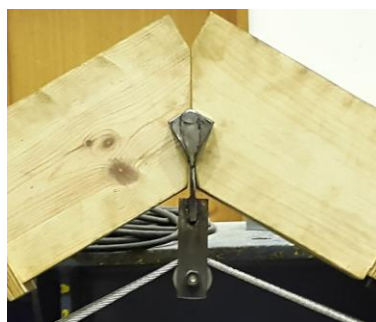


Figura 4-3 - Pormenor da ligação madeira-desviador.

Percebe-se pela figura anterior que o desviador não ficou na posição ideal, que seria no centro da secção de madeira. Neste caso não apresenta um problema pois como se ensaiam secções de madeira maciça, que têm as fibras segundo os seus eixos longitudinais, não existe o perigo de esmagamento da mesma. Numa torre eólica real em CLT, caso isto ocorresse, havia a possibilidade de esmagar a madeira se o desviador exercesse força sobre o seu fio vertical, daí a importância da posição dos desviadores na madeira.

As perdas diferidas de força nos cabos conduziram à realização de um ensaio complementar, com um cabo isolado, para avaliação dessas perdas. Este ensaio consistiu no simples esticamento de um cabo rectilíneo com recurso a um esticador e deixá-lo em tracção durante um período alargado de tempo, até estabilizar a força após perdas, medindo a força aplicada no cabo com uma célula de carga. Testaram-se 2 cabos: o mesmo cabo da experiência anterior, de 6mm, cujo núcleo é em fibra e um cabo não tão deformável e mais resistente, com um núcleo em aço. Os resultados são apresentados no Quadro 4-1:

Quadro 4-1 - Resultados do ensaio à tracção.

	Força Inicial (kN)	Força Final (kN)	Perdas (kN)	Perdas (%)
Cabo 6 mm (Núcleo de Fibra)	3,59	2,51	1,08	30,00
Cabo 6 mm (Núcleo de Aço)	3,43	2,84	0,59	17,1

O cabo utilizado apresenta perdas muito significativas quando comparado com um cabo do mesmo diâmetro, mas com núcleo de aço.

### 4.3 Ensaio da aduela da torre eólica

Depois de avaliado o primeiro ensaio, avançou-se para a fase seguinte, consistindo na montagem de uma aduela de uma torre eólica com 2,60m de altura e um diâmetro nominal circunscrito de 2,40m. O objectivo do ensaio era o de aplicar aos painéis, mediante um sistema de cabos funcionando segundo o princípio anteriormente descrito, um pré-esforço perimetral de compressão, que garantisse o comportamento monolítico do hexágono constituído pelos painéis. Note-se que este objectivo não pode ser assegurado apenas pelo sistema de cabos, uma vez que este não impede mecanismos de "abaulamento" do hexágono. Por isso, este sistema deve ser complementado com outro capaz de contrariar este modo de deformação. Este papel é cumprido por plataformas que se comportam como diafragmas rígidos mas, como já se mencionou anteriormente, o estudo dessas componentes do sistema é objecto de outra dissertação sobre este tema, em vias de conclusão. Dada a dimensão da aduela, a hipótese de realização de ensaios mecânicos, de qualquer tipo, não foi considerada.

Para a montagem e experimentação da aduela da torre eólica em CLT são necessários os seguintes materiais:

- Painéis de madeira lamelada colada, cortados em bisel para formar uma secção hexagonal fechada, com 1,20 metros no lado exterior, 1,10 metros no lado interior, 2,60 metros de altura e 10 cm de espessura (Figura 4-4);





Figura 4-4 - Painéis de CLT.

- Desviadores em aço soldados, produzidos em oficina, que irão transmitir a força aos painéis - inicialmente pensou-se numa solução com 6 cabos (Figura 4-5), mas acabaram por ser feitos com apenas 3 (Figura 4-6), para poupar recursos na sua produção;

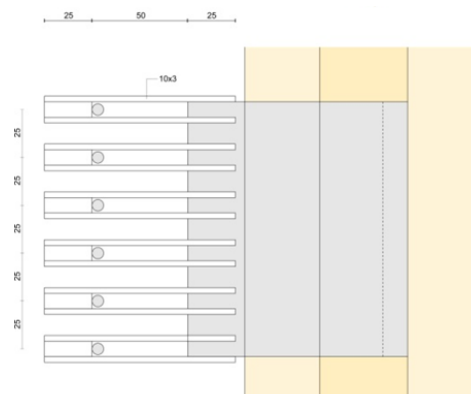


Figura 4-5 - Alçado desviadores em aço (imagem disponibilizada por Prof. João Negrão).



Figura 4-6 - Desviadores em aço para 3 cabos.

- Cabos de aço galvanizado, com um diâmetro nominal de 6 mm e resistência à tracção de 1770 MPa, tensionados durante o ensaio para imprimir forças de compressão e aperto mútuo nas juntas dos painéis de madeira;
- Extensómetros de resistência eléctrica (*strain-gauges*) de 120  $\Omega$ , dos tipos FLK 6-11 e FLA 6-11 (os FLK têm uma largura menor) da marca "Tokyo Sokki Kenkyujo Co.,

Ltd.", aplicados nos desviadores metálicos para medir a variação de tensão nas peças de aço;

- Esticadores, um para cada cabo e aplicados em ramos intercalados segundo o perímetro do hexágono;
- LVDT's (Transformador Diferencial Variável Linear) de 25 mm para medir o alongamento em troços dos cabos e, a partir deste, as respectivas força e tensão a que estão sujeitos;
- Equipamento de medição, Data Logger TDS-602, para registar os dados transmitidos pelos extensómetros e LVDT's ao longo do tempo (as extensões são medidas em  $\mu\epsilon$  - *micro strain*).

Previamente à montagem da torre e realização do ensaio, houve um processo de preparação dos painéis de madeira e colagem dos extensómetros nos desviadores. Durante este espaço temporal, a madeira esteve acondicionada em sala climatizada a 20°C de temperatura e 65% de humidade relativa, de forma a evitar variações dimensionais nos painéis. Os painéis de CLT apresentavam as dimensões anteriormente descritas, não tendo, no entanto, os entalhes requeridos para instalação dos desviadores metálicos. Foi necessário algum trabalho manual com instrumentos, como o serrote ou a grosa, para garantir que cada entalhe tinha as dimensões necessárias para acondicionar o desviador e exercer compressão na área adequada na madeira. Como os desviadores foram feitos em oficina não tinham todos as mesmas dimensões nem a mesma espessura de cordões de soldadura, o que exigiu mais trabalho, pois as aberturas variavam. Na construção de uma torre em tamanho real, os painéis devem ser previamente cortados em fábrica e os desviadores produzidos em série, com dimensões normalizadas.

Outro trabalho a realizar foi a colagem dos extensómetros. Antes de mais, é importante perceber o princípio de funcionamento destes sensores: são resistências eléctricas que, quando sujeitas a uma variação de tensão segundo a direcção em que os fios estão instalados, sofrem uma variação de resistência que é proporcional à extensão do material ao qual estão coladas [(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., 2015); (Valido & Silva, 1997)]. Como a peça está sujeita, predominantemente, a tracção uniaxial, usa-se apenas um extensómetro segundo a direcção desse esforço, que dá o valor da extensão e permite determinar o estado de tensão no ponto onde é aplicado. Há que fazer uma calibração do extensómetro através do factor de sensibilidade transversal (*gauge factor* - K), que relaciona a razão de alteração de resistência ( $\Delta R/R$ ) com a extensão axial ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (1)$$

Esta calibração é feita pelo próprio equipamento de medição, introduzindo, para este modelo de *Data Logger*, um coeficiente de  $2/K$ . Segundo o fabricante, o *gauge factor* de ambos os tipos de extensómetros utilizados no ensaio toma o valor de 2,12.

Para a colagem dos extensómetros procedeu-se inicialmente à preparação da superfície. Como a superfície em aço onde se colam os extensómetros não apresentava um acabamento adequado, realizou-se o lixamento da superfície, utilizando um material abrasivo até se atingir uma rugosidade mínima. É necessário um cuidado especial na limpeza destas superfícies, para eliminar qualquer impureza presente, usando-se uma acetona com elevado grau de álcool. Por fim pode colar-se o extensómetro na superfície livre do material com uma cola apropriada para o efeito (cola de cianoacrilato) e soldar os fios dos extensómetros a cabos condutores ligados ao *data logger*.

Neste ensaio, para conhecer o estado de tensão dos desviadores metálicos, instrumentaram-se os ligadores da seguinte forma:

- Um desviador com 6 extensómetros, um por haste;
- Outros dois desviadores com apenas 3 extensómetros, um por cabo;
- Os restantes com apenas 1 extensómetro na haste superior, tendo assim, para o cabo superior, extensómetros em todos os desviadores e perceber as perdas do sistema aquando do aperto.

O primeiro destinava-se a comprovar se a força num cabo se repartia de igual forma pelas duas hastes às quais a roldana está ligada (de acordo com a estática a força seria igual) e igualmente entre roldanas, tendo em conta, como já foi mencionado, que os esticadores e, portanto, o aperto de cada cabo, se dava em posições situadas a distâncias diferentes do desviador considerado.

Os outros arranjos deveram-se à falta de extensómetros disponíveis para instrumentar da forma descrita anteriormente todos os desviadores. No segundo caso foram instrumentados apenas metade dos ramos de ligação das roldanas o que, no pressuposto de que a relação determinada no primeiro arranjo se mantém, permitiria determinar a força desviada em cada uma. O terceiro arranjo permite, por comparação com os extensómetros em idêntica posição nos 6 desviadores, avaliar as forças instaladas em cada um.

Após a fase de preparação, procedeu-se à montagem da secção da torre. O primeiro passo foi movimentar os painéis desde a zona de armazenamento climatizada para o local de montagem, com recurso à ponte rolante (Figura 4-7.a). A fase seguinte foi elevar cada painel individualmente e sucessivamente (Figura 4-7.b), ligando-os uns aos outros através de ripas

de madeira aparafusadas no topo dos painéis, para conferir o mínimo de estabilidade à estrutura durante a montagem (Figura 4-7.c). Ao juntar dois painéis, colocou-se a ligação entre eles, nos entalhes feitos anteriormente. Por fim colocaram-se os 3 cabos de aço e esticadores na posição correcta, laçando-se as pontas dos cabos para colocar nos ganchos dos esticadores e usando cerra-cabos para não permitir o escorregamento dos mesmos. Foram colocadas 2 cintas a envolver toda a estrutura para conferir estabilidade antes de aplicar uma tensão mínima aos cabos.



Figura 4-7 - Sequência de montagem da aduela: a) movimentação dos painéis; b) erecção dos painéis individualmente; c) conexão dos painéis através de ripas de madeira.

A configuração final da torre observa-se na Figura 4-8, já com o aperto feito (e sem as cintas exteriores):

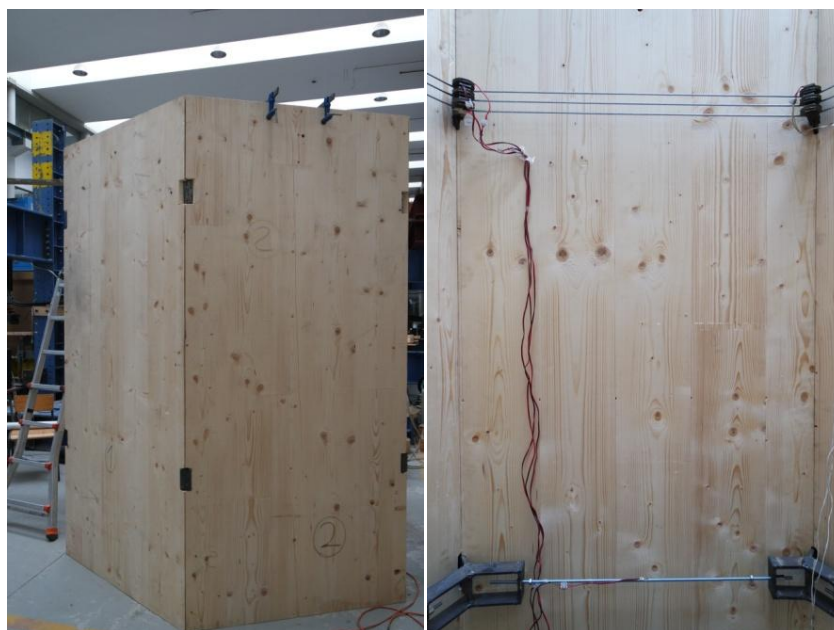


Figura 4-8 - Aduela da torre eólica em CLT e ligações no interior.

O aperto foi feito sequencialmente (cabo superior, cabo inferior e cabo intermédio), dando-se sempre o mesmo número de voltas nos esticadores para que a força aplicada em todos os cabos fosse a mesma. Como a torre tem secção hexagonal oca e há 3 cabos para esticar, colocaram-se os esticadores intervalados de um painel, para que o aperto seja o mais uniforme possível e não se privilegie uma parte da secção em detrimento da outra. Pretende-se atingir uma força de 500 kg por cabo, que numa estrutura real não seria suficiente (a força necessária seria na ordem das 2 toneladas por cabo). No entanto, a força nos cabos medida pelo *data logger* é uma força relativa, isto é, no início do ensaio após retirar as cintas exteriores e aplicar uma tensão mínima aos cabos, colocou-se o *data logger* a registar valores zero de todos os extensómetros e, a partir desse ponto, medir o aperto aplicado. Na realidade os cabos terão um pouco mais de 500 kg aplicados, mas é uma diferença pouco significativa. Na Figura 4-9 mostram-se pormenores dos cabos e do esticador e do desviador instalado na madeira, pelo interior e exterior. Numa estrutura real, o desviador não estaria em contacto com o exterior para evitar a corrosão do aço; neste ensaio, o entalhe da madeira foi feito desta forma por ser mais fácil realizar manualmente os cortes nos painéis de CLT.

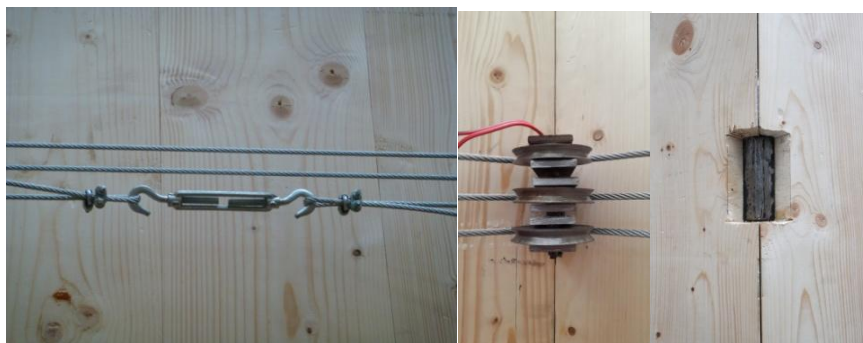


Figura 4-9 - Cabos de aço e esticador do cabo inferior. Desviador instalado na madeira.

Previamente ao ensaio, mediu-se o curso restante no esticador e estimou-se a tensão aplicada no cabo. No cabo superior, como  $\Delta L=15\text{cm}$ , para um comprimento de cabo de aproximadamente 6,0m e um módulo de elasticidade de 62 GPa, chegou-se a uma tensão de 154 MPa. Considerando uma área de cabo de  $21,99\text{mm}^2$  - o cabo é constituído por 7 cordões de 2mm de diâmetro cada - estimou-se uma força no cabo de 345 kg.

No Quadro 4-2 são apresentados os registos das extensões nos desviadores, numerados na Figura 4-10, após aperto dos 3 cabos de aço perimetrais. Os cabos com 2 valores representam a haste superior e inferior.

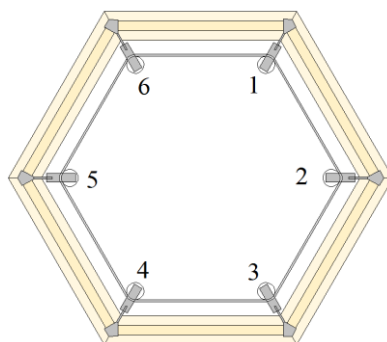


Figura 4-10 - Numeração dos desviadores.

Quadro 4-2 - Extensões nos desviadores.

Extensões nos desviadores				
Desviador	Cabo Superior	Cabo Intermédio	Cabo Inferior	
1	-116,05	-22,84 / -62,23	-2,84 / 4,73	$\mu\epsilon$
2	-168,53	-	-	$\mu\epsilon$
3	-145,95	-53,34	-259,91	$\mu\epsilon$
4	-71,66	-	-	$\mu\epsilon$
5	-126,43	-33,29	-97,29	$\mu\epsilon$
6	-147,49	-	-	$\mu\epsilon$

Que em tensões, com  $E_{aço}=210$  GPa, se traduz nos seguintes resultados (Quadro 4-3):

Quadro 4-3 - Tensões nos desviadores.

Tensões nos desviadores				
	Cabo Superior	Cabo Intermédio	Cabo Inferior	
1	-24,37	-4,80 / -13,07	-0,60 / 0,99	MPa
2	-35,39	-	-	MPa
3	-30,65	-11,20	-54,58	MPa
4	-15,05	-	-	MPa
5	-26,55	-6,99	-20,43	MPa
6	-30,97	-	-	MPa

Admitindo que a força transmitida por cabo ao desviador é igual nas duas hastes (o que não aconteceu na realidade, pois as roldanas não permaneceram perfeitamente horizontais durante o ensaio), tem-se a seguinte equação e as seguintes tensões no cabo (Quadro 4.4):

$$2 \cdot F_{desviador} = 2 \cdot F_{cabo} \cdot \cos(60) \quad (2)$$

Quadro 4-4 - Tensões nos cabos de aço.

Tensões nos cabos				
	Cabo Superior	Cabo Intermédio	Cabo Inferior	
1	-332,46	-65,48 / -178,30	-8,19 / 13,51	MPa
2	-482,80	-	-	MPa
3	-418,12	-152,81	-744,59	MPa
4	-205,29	-	-	MPa
5	-362,20	-95,37	-278,72	MPa
6	-422,53	-	-	MPa

Tais tensões implicariam que os cabos estavam sujeitos a maior tensão do que aquela determinada tendo em conta o curso restante do esticador, o que não é possível. Foram registadas as extensões durante vários dias para analisar as possíveis perdas no cabo, mas face aos resultados obtidos optou por não se fazer essa análise.

Para averiguar possíveis causas para estas disparidades, instalaram-se dois LVDT's para medir o deslocamento linear de secções do cabo superior, em mm, repetindo-se o aperto dos cabos para secções diferentes da torre. Estes sensores foram utilizados para confirmar a força

aplicada num dos cabos (o superior, por ser o mais acessível de instrumentar com os LVDT's), comparando esse valor com o dado pelos extensómetros. Os defletómetros utilizados têm uma gama de medição de  $\pm 25\text{mm}$  e, nas medições, movem-se quase sem atrito, apresentando grande fiabilidade. No *data logger* teve de se programar um coeficiente de 0,002, que é função do campo de medida (25mm) e da sensibilidade do defletómetro.

O deslocamento da secção do cabo,  $\Delta L$ , é determinado pela diferença das leituras registadas no *data logger* transmitidas pelos LVDT's. Dividindo esse valor pela distância entre os dois sensores,  $L$ , obtém-se a respectiva extensão,  $\varepsilon$ . Conhecendo o módulo de elasticidade do cabo de aço,  $E$ , pela lei de Hooke -  $\sigma = \varepsilon \cdot E$  - determina-se a tensão aplicada no cabo. Na Figura 4-11 observam-se os dois LVDT's usados numa das secções do cabo superior:



Figura 4-11 - Defletómetros instalados no cabo superior.

Repetiu-se o ensaio de tracção do cabo superior com os defletómetros (LVDT) instalados em diferentes secções desse cabo, assinaladas na Figura 4-12. Procurava-se analisar a fiabilidade dos resultados dos extensómetros, comparando as tensões do cabo superior para cada um dos aparelhos de medição. Os resultados estão resumidos na Quadro 4-5:

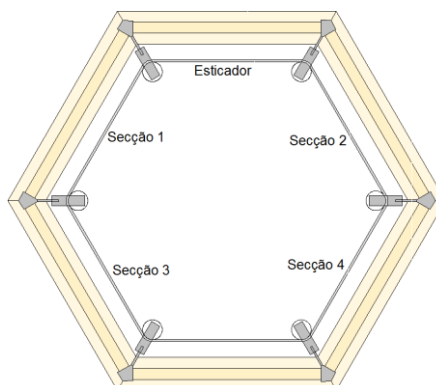


Figura 4-12 - Secções do cabo superior analisadas.



Quadro 4-5 - Tensões no cabo superior, em MPa.

Tensões nos diferentes troços do cabo, em MPa					
	$\Delta L$ (mm)	L (m)	$\varepsilon$	E (GPa)	$\sigma$ (MPa)
Secção 1	0,09	0,68	0,000132	61,78	8,18
Secção 2	0,44	0,755	0,000583		36,00
Secção 3	0,25	0,642	0,000389		24,06
Secção 4	0,43	0,705	0,000610		37,68

O cabo utilizado tem, como referido, uma tensão de cedência de 1770 MPa, pelo que ao solicitá-lo a tensões de, no máximo, 40 MPa, se atingiu apenas 2% da sua capacidade máxima.

Após a realização deste ensaio, comprova-se que existe uma grande discrepância entre os resultados obtidos pelos extensómetros e defletómetros. Enquanto nos dados transmitidos pelos extensómetros se poderia pensar que estavam aplicadas tensões nos cabos com mais de 100 MPa, nos LVDT esse valor não ultrapassou os 40 MPa.

As tensões e forças em jogo são muito reduzidas comparando com o inicialmente previsto e, ao trabalhar com tensões tão baixas, podem ter-se originado os erros nas leituras dos extensómetros. Devem trabalhar-se com tensões mais elevadas para minimizar possíveis erros nos extensómetros alterando o método de aperto, substituindo os esticadores por um sistema de tensionamento dos cabos com varões roscados, ou melhorar esse mesmo sistema, impossibilitando os laços que seguram os esticadores de se alongarem quando os cabos são traccionados.

## 5 LIGAÇÃO ENTRE ADUELAS COM CHAPAS DE AÇO

O sistema de ligação estudado no capítulo anterior assegura que os painéis ficam comprimidos uns contra os outros, formando secções monolíticas e compactas. No entanto, de aduela para aduela não existe nenhum elemento que as impeça de se moverem umas em relação às outras, pois os painéis não se encontram ligados nas juntas horizontais.

As forças de compressão, provenientes principalmente do peso próprio da estrutura e acção horizontal do vento são transmitidas por contacto entre os painéis de CLT até à fundação. A madeira apresenta boa resistência à compressão paralela ao fio (24 MPa) pelo que o simples apoio dos painéis uns sobre os outros é suficiente para resistir a estes esforços actuantes.

As forças de tracção, provocadas pela flexão da torre devido à acção do vento e de componentes como as pás e o rotor, seriam bastante desfavoráveis na madeira. Para resistir a estas tensões considera-se uma ligação com chapas de aço, introduzidas em cortes longitudinais na madeira, ao longo de toda a espessura e largura interior do painel. Pretende-se fazer um estudo paramétrico, variando o espaçamento entre as chapas metálicas,  $s$ , e a altura da chapa,  $h$ , para uma determinada espessura de chapa,  $e$ . Estudaram-se chapas de 3 e 5 mm, por serem espessuras comerciais habitualmente usadas. É esquematizado na Figura 5-1 a ligação entre os painéis com as chapas de aço.

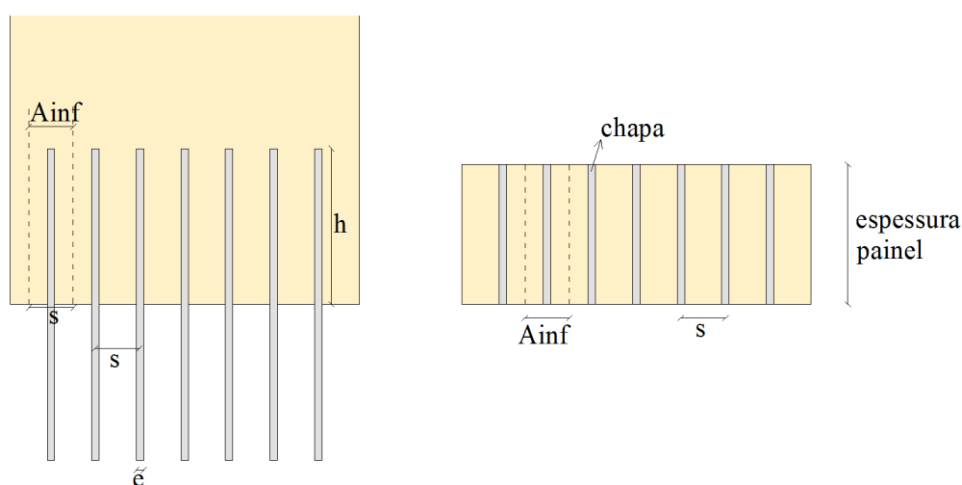


Figura 5-1 - Ligação com chapas de aço: a) Alçado; b) Vista Superior.

Com esta configuração, as tracções na madeira são desviadas para o aço e deste para o painel inferior, e assim sucessivamente até à fundação, como se vê na Figura 5-2.

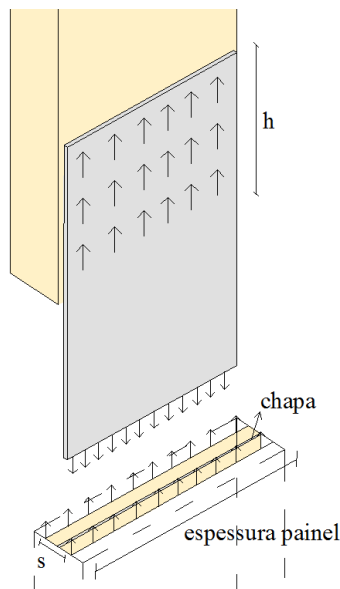


Figura 5-2 - Forças de tracção na madeira e chapa de aço.

As chapas serão coladas à madeira, mas assume-se que a cola é resistente o suficiente e não se considera no cálculo. Admitindo que a madeira está sujeita a uma tracção igual à resistência à tracção paralela às fibras e que o aço apresenta uma tracção igual à sua tensão de cedência à tracção:

$$f_{s,y,d} \cdot e \cdot e_{\text{painel}} \geq f_{t,0,d} \cdot s \cdot e_{\text{painel}} \quad (3)$$

O valor de cálculo de resistência à tracção paralela às fibras,  $f_{t,0,d}$ , é determinado pela seguinte expressão:

$$f_{t,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{16,5}{1,25} = 11,88 \text{MPa} \quad (4)$$

O valor característico de resistência à tracção paralela às fibras,  $f_{t,0,k}$  é de 16,5MPa (ver Tabela 3-1),  $k_{\text{mod}}$  é obtido do Quadro 3.1 de EN1995-1-1:2004, admitindo uma classe de serviço 2 e acções de curta duração, e o coeficiente parcial de segurança do material,  $\gamma_M$ , é obtido do Quadro 2.3 da norma supracitada.

Para as chapas de aço considerou-se um aço S355. O valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço,  $f_{s,y,d}$ , é determinada pela EN1993-1-1:

$$f_{s,y,d} = \frac{f_{s,y,k}}{\gamma_M} = \frac{355}{1,15} = 308,70MPa \quad (5)$$

Outra condição a verificar é o corte na madeira, no interface aço-madeira. Admitindo que a madeira está sujeita a uma tensão igual ao valor de cálculo da resistência ao corte,  $f_{v,d}$ , a força mobilizada na madeira no interface aço-madeira deve ser no máximo igual à força de tracção na madeira no painel inferior:

$$f_{v,d} \cdot h \cdot e_{\text{painel}} \cdot 2 \leq f_{t,0,d} \cdot s \cdot e_{\text{painel}} \quad (6)$$

Fixando valores para a espessura da chapa de 3 e 5 mm, determinam-se, através das expressões (3) e (6), o espaçamento máximo,  $s_{\max}$ , e altura mínima da chapa,  $h_{\min}$ , apresentados no Quadro 5-1.

Quadro 5-1 -  $s_{\max}$  e  $h_{\min}$  para uma determinada espessura

e = 3mm		e = 5mm	
s (mm)	h (mm)	s (mm)	h (mm)
≤ 77,95	≥ 238,19	≤ 129,92	≥ 396,98

Logicamente que estas medidas correspondem a um caso em que a madeira e o aço estão sujeitos às tracções máximas, o que não ocorrerá numa situação real, podendo escolher-se outras gamas de valores para espaçamento e altura de chapa. Diminuindo o espaçamento, diminui também a altura das chapas. As chapas ficam mais próximas e a força de tracção por área de influência é menor, logo a força de corte na madeira é também menor.

## 6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção de torres eólicas em CLT é já uma realidade na Alemanha e afigura-se estruturalmente viável. Com a montagem de uma aduela desta envergadura, compreende-se a exequibilidade do processo e os desafios para o futuro. Ainda que construída artesanalmente, foi possível montar a aduela com todos os desviadores na posição correcta. Num projecto em escala real, os painéis devem vir já cortados de fábrica e os desviadores produzidos em série, com dimensões normalizadas, o que facilitará imenso todo o processo de montagem.

Este sistema inovador de ligação entre painéis de CLT é uma solução que apresenta a vantagem da inexistência de uma estrutura de suporte interior. Também o método de montagem pelo interior é vantajoso, pois não necessita da movimentação de máquinas de grandes dimensões e, como os painéis são elevados pelo interior da torre, possibilita esta operação com ventos mais fortes. O que não é possível no caso de se utilizar uma grua.

Ainda que os resultados obtidos não correspondam ao inicialmente previsto, não possibilitando assim respostas conclusivas, o ensaio foi importante pois permitiu identificar aspectos que influenciaram os resultados - alguns tão díspares como as tensões dos cabos perimetrais. Por se tratar de uma primeira abordagem a esta matéria, toda a informação recolhida é relevante para melhorar outros projectos que se venham a desenvolver nesta área.

Alguns dos problemas verificados durante o ensaio da aduela da torre eólica em CLT foram:

- A tracção nos cabos provocou, provavelmente, flexão lateral nos desviadores o que originou perdas muito significativas.
- Este sistema de ligação apresentou grandes perdas diferidas por atrito nos desviadores. As roldanas, quando solicitadas pelo cabo à tracção, exercem uma força muito elevada sobre os veios a que estão soldadas, impedindo-as de rodar e acompanhar o movimento do cabo. Por não rodarem, provocam atrito com o cabo. Em trabalhos futuros deve idealizar-se um desviador, com esferas de rolamentos, que reduza consideravelmente o atrito e permita que o cabo escorregue quando solicitado. Para além disso, o sistema deve ser muito bem lubrificado, para o atrito ser mínimo.

- Quando o cabo é carregado, as roldanas dos desviadores não ficam perfeitamente horizontais, pelo que provocam flexão na peça metálica e provocam maior tensão numa haste que noutra.
- Durante o processo de tração do cabo, os laços que o prendem ao esticador com os cerra-cabos, tendem a fechar e a alongar, reduzindo assim o curso do esticador para o aperto do cabo. Quer isto dizer que grande parte do aperto não contribuiu para o esticamento do cabo, tendo sido aplicadas tensões muito baixas, que potenciaram erros nas leituras dos extensómetros. Uma solução possível seria colocar um cilindro dentro dos laços, para impedir que estes alonguem, conseguindo-se assim aplicar mais tensão no cabo. Contudo, não foi possível testar esta solução em tempo útil.

O desenvolvimento deste estudo é imprescindível e fundamental para o avanço deste conceito e para a sua implementação numa estrutura real. O mais relevante para já é dispor de um desviador que apresente o mínimo de atrito possível e realizar os mesmos procedimentos. Considerando uma esfera de rolamentos nas roldanas dos desviadores, diminui-se bastante o atrito provocado no interface aço-aço.

Em trabalhos futuros é necessário ensaiar desviadores com 6 cabos para definir um sistema de aperto ideal em obra. No sistema com 3 cabos essa ordem era indiferente, mas num sistema com 6 cabos há mais variáveis a considerar e é essencial ter isso definido caso se pretenda construir uma torre real. Também se devem analisar painéis com mais de 3 lamelas e comparar as diferenças com o sistema mais simples.

Deve-se estudar também a variação de espessura, que não é constante desde a base até ao topo, ao longo da altura dos painéis de CLT e avaliar a ligação com chapas de aço entre as aduelas, nomeadamente os interfaces madeira-cola e cola-aço. É ainda de extrema importância considerar a acção da fadiga numa estrutura deste tipo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. Wiley.

Castro, R. (2003). *Introdução à Energia Eólica* (1ª Edição ed.). Instituto Superior Técnico.

Certex. (2014). Obtido de <http://www.certex.co.uk/>

Corbetta, G., Pineda, I., & Wilkes, J. (2015). *Wind in Power - 2014 European Statistics*. The European Wind Energy Association.

Danish Wind Industry Association. (2003). *Wind Power*. Obtido em Abril de 2015, de <http://www.windpower.org>

Dodge, D. M. (2015). *Wind Power Development*. Obtido de <http://telosnet.com/wind/>

Engström, S., Lyrner, T., Hassanzadeh, M., Stalin, T., & Johansson, J. (2010). Tall Towers for Large Wind Turbines. *Vindforsk project V-342*.

FPInnovations. (2013). *CLT Handbook: cross-laminated timber*. USA: Karacabeyli, Erol; Douglas, Brad.

GWEC. (2015). Obtido em Abril de 2015, de <http://www.gwec.net>

Hassanzadeh, M. (2012). *Cracks in onshore wind power foundations*. *Elforsk rapport 11:56*.

Hau, E. (2006). *Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (2ª ed.). Germany: Springer.

INEGI. (2014). *Parques Eólicos em Portugal*.

INNEO - Precast Concrete Wind Towers. (2008). Obtido de <http://www.inneo.es/>

Johnson, G. (2001). *Wind Energy Systems*. Prentice Hall PTR.

KLH UK. (2014). Obtido de <http://www.klhuk.com/>

Kulak, G., Fisher, J., & Struik, J. (2001). *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints* (2ª Edição ed.). American Institute of Steel Construction, Inc.

- 
- LaNier, M. (2005). *LWST Phase I Project Conceptual Design Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers*. National Renewable Energy Laboratory. Subcontract report NREL/SR-500-36777.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. (2002). *Wind Energy Explained*. University of Massachusetts, Amherst, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer.
- NorthstarWind. (2015). Obtido em Março de 2015, de <http://www.northstarwind.com/>
- NP EN 1194. (2002). Estruturas de Madeira. European Committee for Standardization.
- Olivier, J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., & Peters, J. (2014). *Trends in global CO2 emissions: 2014 Report*. PBL and Joint Research Centre.
- Reve - Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. (2015). Obtido de <http://www.evwind.com/>
- Schaumann, P., & Collmann, M. (2013). Influence of Weld Defects on the Fatigue Resistance of Thick Steel. *Procedia Engineering*, 66, 62-72.
- The Danish Government. (2011). *Energy Strategy 2050 - from coal, oil and gas to green energy*.
- TimberTower. (2014). Obtido em Março de 2014, de <http://www.timbertower.de/en/>
- Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. (2015). Obtido de <http://www.tml.jp/e/>
- Training Course. (2011). *Wind Towers: Design by FEM and Technological Features*. Universidade de Coimbra, Portugal: Portugal.
- Tricklebank, A., Halberstadt, P., & Magee, B. (s.d.). *Concrete Towers for Onshore and Offshore Wind Farms*. The Concrete Centre.
- Valido, A., & Silva, J. (1997). *Introdução à Extensometria Eléctrica de Resistência*. Escola Superior Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica.
- Veljkovic, M., & Husson, W. (2009). *High-strength wind turbine steel towers*. Suécia: Report from Vindfrosk project V-223.
- Veljkovic, M., Feldman, M., Naumes, J., Pak, D., Rebelo, C., & Simões da Silva, L. (Setembro de 2010). Friction connection in tubular towers for a wind turbine. (E. & Sohn, Ed.) *Stahlbau*, 79, 660-668.
-



Ventura, D. (2015). *Torres Eólicas em Madeira Lamelada Colada Cruzada*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado.

*Wind Power Engineering & Development*. (2015). Obtido de <http://www.windpowerengineering.com/>

*Wind Technologies*. (2011). Obtido de <http://www.windtechnologies.com/>

*World Energy Outlook*. (2014). Obtido em Março de 2015, de <http://www.worldenergyoutlook.org/>

*World Wind Energy Association*. (2014). Obtido em Abril de 2015, de <http://www.wwindea.org>

*Worldsteel Association*. (2012). Obtido em Abril de 2015, de <https://www.worldsteel.org/>