

The background of the entire image is a silhouette of a wind farm at sunset. The sky is a warm, golden-orange color, and the sun is visible in the upper left corner, partially obscured by the blades of a wind turbine. The turbines are arranged in a line across the horizon, with their towers and blades clearly visible against the bright sky.

**ENGENHEIRO
EVANDRO DUARTE**



EOLICABRAS

TORRES DE CONCRETO

MAIS ALTO PARA IR MAIS LONGE





Torres eólicas em concreto pré-moldado protendido, sua evolução e sua aplicação no Brasil

Sumário

- 1) Introdução
- 2) Aplicações universais – aço e concreto
- 3) Comparação entre as soluções – metálica e concreto
- 4) Considerações de cálculo de uma torre
- 5) Soluções de torres de concreto pré-moldado protendido no mundo
- 6) Soluções no Brasil - protótipo

1) Introdução

A energia eólica sempre foi utilizada desde a antiguidade como, por exemplo, no século 1 D.C. na Grécia através de uma roda movida pelo vento para movimentar uma máquina. Antes já se tinha proveito desta energia através dos barcos a vela movimentando-se pelos mares. Os Moinhos de Vento da Idade Média tiraram partido desta Energia para moer os grãos dos cereais e bombear água para utilização das pessoas.

A geração de energia elétrica para a utilização industrial, comercial e caseira veio através da Revolução Industrial mas durante sua evolução sua geração acabou esquecendo a aplicação eólica (vento) e ficou muito restrita à Energia advinda da água.

No século XIX os Moinhos declinaram e aumentou a utilização de máquinas a vapor (novamente a utilização da água).

O primeiro moinho utilizado para a produção elétrica foi construído na Escócia, em 1887, para gerar energia elétrica de aplicação caseira.

Em 1888, Charles Brush promoveu o surgimento da eletricidade com os primeiros protótipos de turbina eólica com a tecnologia baseada no tradicional moinho de vento.

A seguir apresentaremos a cronologia das pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desta solução:

Charles F. Brush (1849-1929), um dos fundadores da indústria elétrica norte-americana. No inverno de 1887-88, Brush construiu uma máquina considerada a primeira turbina eólica automatizada para produção de eletricidade. Tendo em conta as condições da época, as dimensões eram enormes: Diâmetro do rotor: 17m (50pés), 144pás de rotor em madeira de cedro. A turbina funcionou durante 20 anos e alimentava as baterias na cave da casa de Brush. Apesar das dimensões, a turbina gerava somente 12 kW de eletricidade.

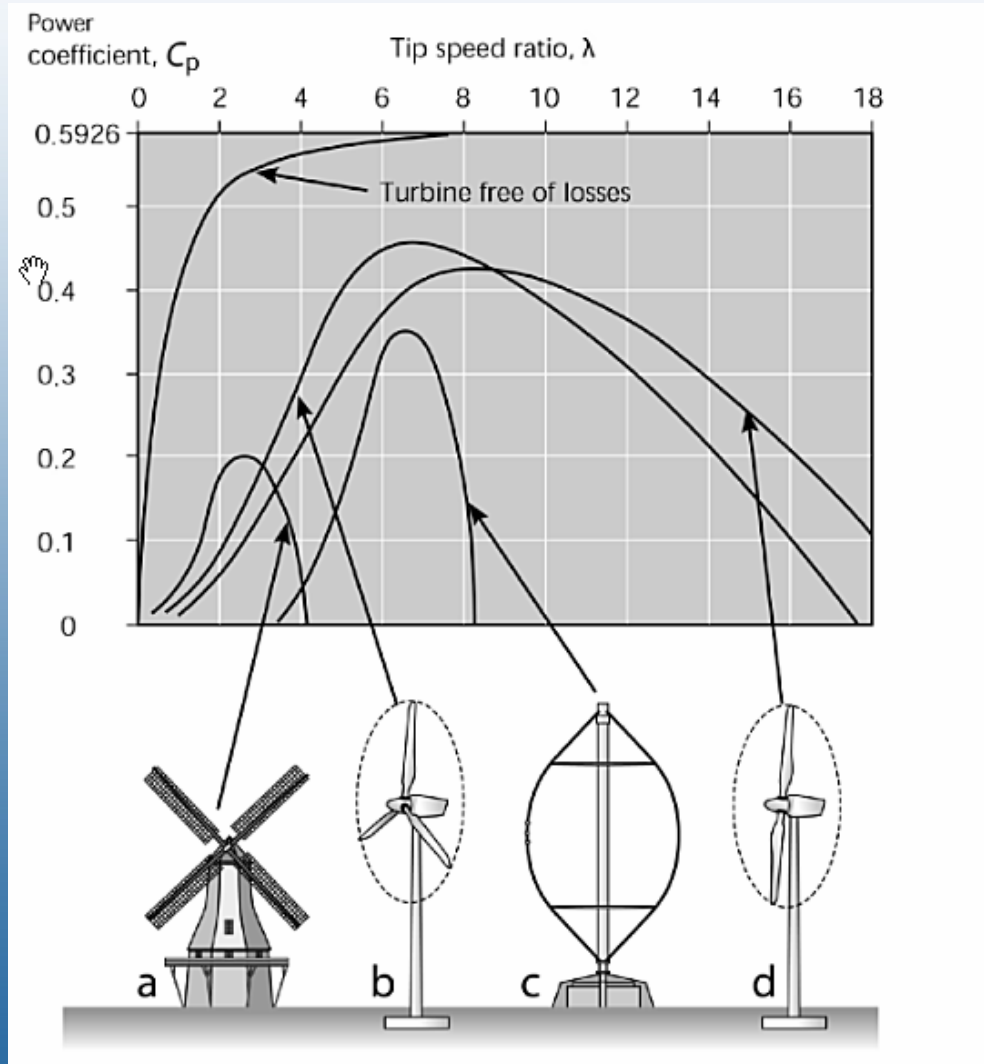
Poul la Cour (1846-1908), meteorologista dinamarquês. É considerado o pai da indústria eólica moderna. A sua primeira turbina eólica comercializável foi instalada após a Primeira Guerra Mundial, durante um período de escassez generalizada de combustível. Fundou o primeiro centro de investigação de energia eólica em Jütland, onde ministrou os primeiros cursos a engenheiros eólicos. Juntamente com as suas primeiras experiências na técnica dos túneis de vento publicou a primeira revista mundial sobre energia eólica.

Albert Betz (1885-1968), físico alemão. Como diretor do Instituto de Aerodinâmica em Göttingen, formulou a lei Betz, demonstrando que o máximo físico da utilização da energia cinética do vento reside nos 59,3%. A sua teoria sobre o design das pás continua ainda hoje a ser a base da construção dos equipamentos.

Palmer Cosslett Putnam (1910-1986), engenheiro norte-americano. Desenvolveu a turbina eólica 1,25 MW Smith Putnam, em 1941, que funcionou com interregnos até 1945 e foi encerrada devido a danos nos materiais de construção. Esta turbina teve um reduzido período de vida útil e foi encerrada devido a problemas causados por materiais de construção inapropriados. Os materiais modernos e os padrões de qualidade utilizados atualmente ainda não haviam sido desenvolvidos. Os materiais e a qualidade necessários para estas dimensões ainda não existiam.

Ulrich W Hüttner (1910-1990), engenheiro alemão.
A sua turbina 100 KW StGW-34, instalada em 1957 num campo experimental nos Alpes Suábios, é considerada um dos marcos da tecnologia de energia eólica moderna.

Johannes Juul (1887-1969), engenheiro dinamarquês. Aluno de Poul la Cour. Construiu a primeira turbina eólica do mundo (200 KW) para produção de corrente alternada, na Dinamarca, em Vester Egesborg, em 1957. Esta turbina é o protótipo das turbinas eólicas modernas.



Evolução dos aerogeradores

Com a crise do petróleo em 1973, foi estimulada a pesquisa de outras fontes de energia. A partir desta época, foi dada a partida para a aplicação da geração de energia a partir dos ventos, associando-se mais ainda ao surgimento do movimento contra a utilização da energia nuclear.

A partir desta época, os institutos de pesquisa conseguiram implementar padrões internacionais, uma regulamentação e um design mais eficiente, o que acarretou o surgimento de parques eólicos modernos e economicamente viáveis, reduzindo os anteriores custos elevados da aplicação.

No Brasil, existe um grande potencial para o mercado de energia eólica devido à necessidade de uma maior demanda de energia eólica produtiva industrial e do respeito a não agressão ao meio ambiente causado na implantação de grandes barragens.

Atualmente, o mercado de energia eólica no Brasil está produzindo 1000 MW por ano e sua necessidade é de 2000 MW.

A frase do químico francês Lavoisier é bem aplicada neste caso “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”, fazendo a energia eólica ser transformada em energia elétrica.







(Monet's "*Zaan River at Zaandam*," 1871)





Com o advento desta aplicação ao longo de todo o mundo, vários países tomaram a frente, notadamente a Alemanha e Espanha, na Europa, e a China, na Ásia.

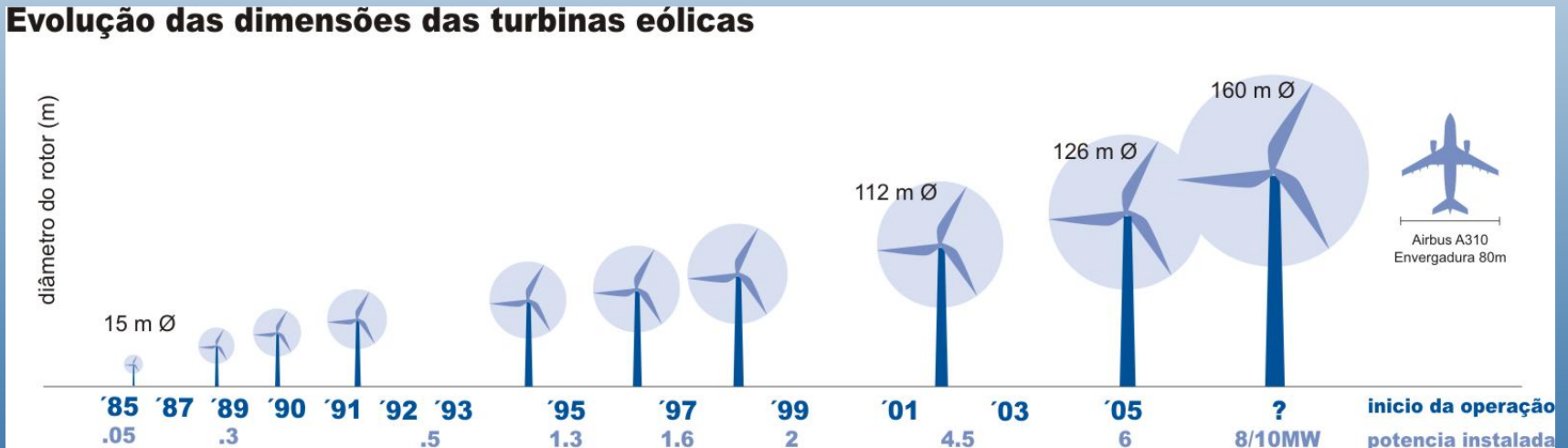
Os fabricantes partiram da Europa e se estenderam por todo o mundo, podendo ser citadas as seguintes marcas como exemplo:

- Gamesa
- Vestas
- Enercon

- GE
- Nordex
- Siemens

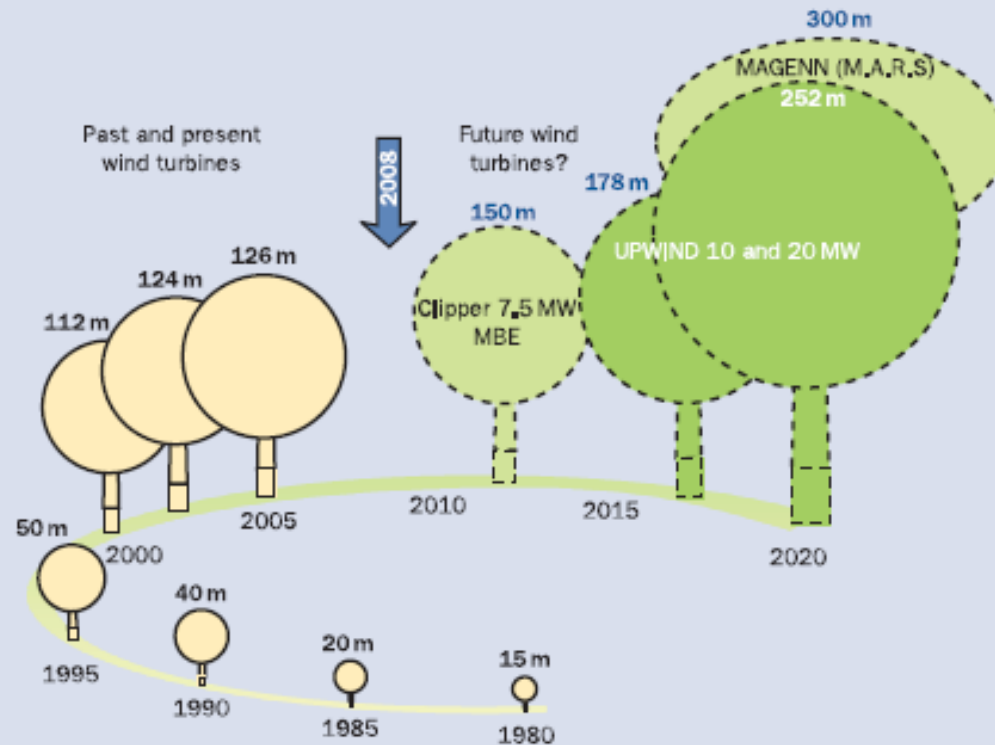
A potência gerada por um único aerogerador era inferior a 1 MW (década de 80), porém atualmente sua potência vai de 2 MW até 6 MW, sabendo-se que a transformação desta em energia real, devido tanto à intermitência do vento à sua transformação em energia, tem uma redução de até 50%.

Evolução das dimensões das turbinas eólicas



Evolução das dimensões das turbinas eólicas

Figure S.4: Growth in size of commercial wind turbine designs



Source: Garrad Hassan

Crescimento e tamanho do projeto comercial das turbinas

2) Aplicações universais – aço e concreto

Para uma análise mais completa entre as soluções das torres metálicas e as de concreto, devem ser analisados o aspecto de Comportamento Estrutural, e o aspecto de custo global (materiais + serviços + transporte + montagem) como também da facilidade e flexibilidade de aquisição dos materiais na região ou país onde as torres serão implantadas.

No nosso caso, iremos abordar estas comparações, não somente pela experiência vivida pelos outros países, mas com maior propriedade em termos das situações existentes aqui em nosso país.

Quanto ao aspecto de comportamento estrutural, deve-se analisar o desempenho do tipo de torre para uma dada altura de aerogerador.

Podemos verificar que, para as menores alturas, a solução em torres metálicas é bem competitiva, por não sofrer com o problema dos efeitos relativos às ações dinâmicas atuantes. Quanto mais a altura aumenta, mais da necessária se torna a rigidez da seção transversal da torre, para absorver adequadamente esses efeitos relativos às ações dinâmicas.

Como a espessura da parede da torre esta ligada à resistência estrutural do material, a torre metálica tem uma boa resistência mecânica estrutural com uma pequena espessura de parede, sendo, assim, uma solução no campo estático, porém perde capacitação no campo das ações dinâmicas. A solução de torre em concreto necessita, para o combate às ações estáticas, uma espessura relativamente grande, tendo, portanto, também um bom comportamento desta quanto às ações dinâmicas.

Cabe aqui neste ponto ressaltar que o problema relativo ao peso bem diferente de cada uma das aduelas componentes de cada uma dessas soluções torna-se pouco sensível no custo de Montagem / Içamento, tendo em vista que os equipamento necessários à movimentação e posicionamento dessas peças são mais condicionados e dimensionados pela altura, conduzindo-se, então, à necessidade de utilização de guindaste de grande porte não tão diferenciados pelo peso de içamento de cada uma das aduelas componentes das torres.

Na literatura existente e nos estudos por nós desenvolvidos aqui no Brasil, a curva de Custos x Benefícios entre as duas soluções conduz a um ponto de convergência na altura de 80,00 m, sendo, então, a partir daí mais competitiva a solução de torres em concreto. (torre protótipo executada pela Eolicabras e pelos projetos já por ela desenvolvidos).

F. J. Brughuis, Advanced Tower Systems BV



Steel and hybrid tower prices (including transport and installation)



As soluções aqui no Brasil, em função da localização das regiões propícias à implantação dessas torres, conforme podem ser vistas no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, conduzem, em razão das velocidades dos ventos e de suas alturas, à utilização de torres com alturas superiores a 100,0 m. Assim, a solução de torres em concreto passa a ser totalmente viável.

Sendo a utilização de concreto a melhor solução, fica conseqüentemente óbvio que, para dar resposta executiva a esta aplicação, necessária se torna a utilização de peças / aduelas pré-moldadas. Já, para conferir a integridade estrutural e bom comportamento em todas as seções de cálculo, predominantemente nas juntas entre peças pré-moldadas, torna-se necessária a aplicação de protensão, para o combate tanto aos Estados Limites de Utilização (fissuração, fadiga e deformação/limite de deslocamento da Nacele) quanto aos Estados Limite Último (verificação à ruptura).

3) Comparação entre as soluções – metálica e concreto

a) Baixa Manutenção

Pelo fato do concreto resistir melhor à agressividade do meio ambiente e também a não necessidade de se efetuar “re-apertos” de parafusos de ligação entre peças, de tempos em tempos.

b) Maior Durabilidade

O Concreto de Alto Desempenho utilizado nessas soluções tem grande Compacidade, conferindo melhor comportamento de durabilidade ao material.

c) Ausência da Oxidação

Não há necessidade de pintura anti-corrossiva de proteção.

d) Melhor Comportamento Dinâmico

Devido à maior rigidez da seção transversal, o comportamento frente às Ações Dinâmicas conduz não somente a restringir grandes deslocamentos, mas também ao menor dimensionamento das seções por essa ação.

e) Menor Fadiga

Devido ao exposto no item anterior, as tensões de trabalho dos materiais são menores arrefecendo tanto as majorações de materiais causadas pelo dimensionamento à Fadiga quanto a viabilização dos deslocamentos limites possíveis no Rotor do aerogerador.

f) Maior Resistência ao Fogo

Devido as espessuras das paredes e seus recobrimentos necessários, as armaduras estão melhor protegidas do grande gradiente térmico que ocorre por ocasião de um acidente com incêndio.

g) Menor Custo relativo entre o Aço Estrutural e o Concreto Armado/Protendido

Como no Brasil temos uma grande potencialidade das soluções em concreto x soluções em aço estrutural com relação ao custo de cada uma dessas soluções, também na aplicação de torres eólicas continua válida esta comparação.



h) Grande Facilidade de Industrialização das Peças de Concreto

Como os materiais componentes do concreto são encontrados em todas as regiões do país, torna-se mais competitiva a produção de peças pré-moldadas em canteiros de pré-fabricação, os quais podem ser montados na proximidade da região da construção das torres.

i) Ausência do Problema de Flambagem Localizada

Este problema apenas ocorre em peças delgadas submetidas a grande tensões, caso das torres metálicas.

j) Interrupção de Produção

A torre de concreto da mesma altura do que a de aço tem maior rendimento de energia por fazer funcionar o aerogerador com ventos maiores e por mais tempo.

4) Considerações de cálculo de uma torre

A tecnologia do concreto pré-fabricado aplicado às torres eólicas constitui uma nova técnica que reúne uma ampla variedade de conhecimentos específicos.

Nas estruturas tradicionais, o projeto está condicionado as verificações dos estados limite de serviço e estado limite ultimo. Uma vez definido o projeto, se realizam as correspondentes comprovações a “Fadiga”. Nas torres eólicas de concreto, a estrutura se encontra submetida a cargas de “Fadiga” muito importantes, e de milhões de ciclos. Por tanto o projeto vem condicionado pelas “Comprovações de Estado Limite de Serviço e de Cálculo a FADIGA”.

Uma vez dimensionada a estrutura com base nas comprovações anteriores, se realiza a comprovação a ruptura.

O desenvolvimento de Projeto parte dos Dados de Cargas que informam os fabricantes do aerogerador: Valores de Serviço, Valores Últimos, Matrizes de Markov de Momentos Fletores as distintas alturas da torre, junto com as propriedades mecânicas da estrutura empregada para o cálculo destas cargas e dos demais requisitos funcionais.

O PROCESSO É ITERATIVO. A partir dos esforços de flexão recebidos se realiza o pré-dimensionamento da geometria e protensão da estrutura para suportar as cargas de serviço e as cargas de fadiga pela Regra de Plagem-Miner de Dano acumulado. A estrutura dimensionada se comprova por ultimo, tanto a flexão quanto ao acumulado (superposição) torção e cortante, determinando as armaduras necessárias. Uma vez concluído o processo de pré-projeto se volta a remeter ao fabricante do aerogerador as características mecânicas da estrutura, com um duplo objetivo:

- Verificar se as frequências próprias da mesma são compatíveis com o funcionamento da turbina;
- Realizar uma nova iteração para obter um conjunto de cargas.

Especifica para a estrutura de concreto dimensionada com o novo conjunto de cargas obtido se verifica a validade do pré-projeto. No caso das cargas maiores que as iniciais e a estrutura não possa suportá-las, se repete o processo. Em caso que sejam menores, pode optar-se por apurar o projeto. Para ajustá-lo ao máximo, ou dar validade a estrutura dimensionada.

Um aspecto do projeto de torre de concreto para aerogeradores que difere do projeto habitual em concreto armado e protendido é a determinação dos valores de serviço das cargas a empregar nas distintas comprovações exigidas segundo o método dos Estados Limites.

Em Construção Civil, os valores dos Esforços quase-permanentes, empregados para verificar a descompressão de uma estrutura protendida, se define com aquela que tem a probabilidade de 50% ser ultrapassado durante a vida útil da estrutura.

Com base nisto, define-se as distintas Normativas como o peso próprio da estrutura, mais as cargas permanentes, mais uma porcentagem determinada das sobrecargas, e em geral supõem uma porcentagem significativa (60% à 65%) das cargas.

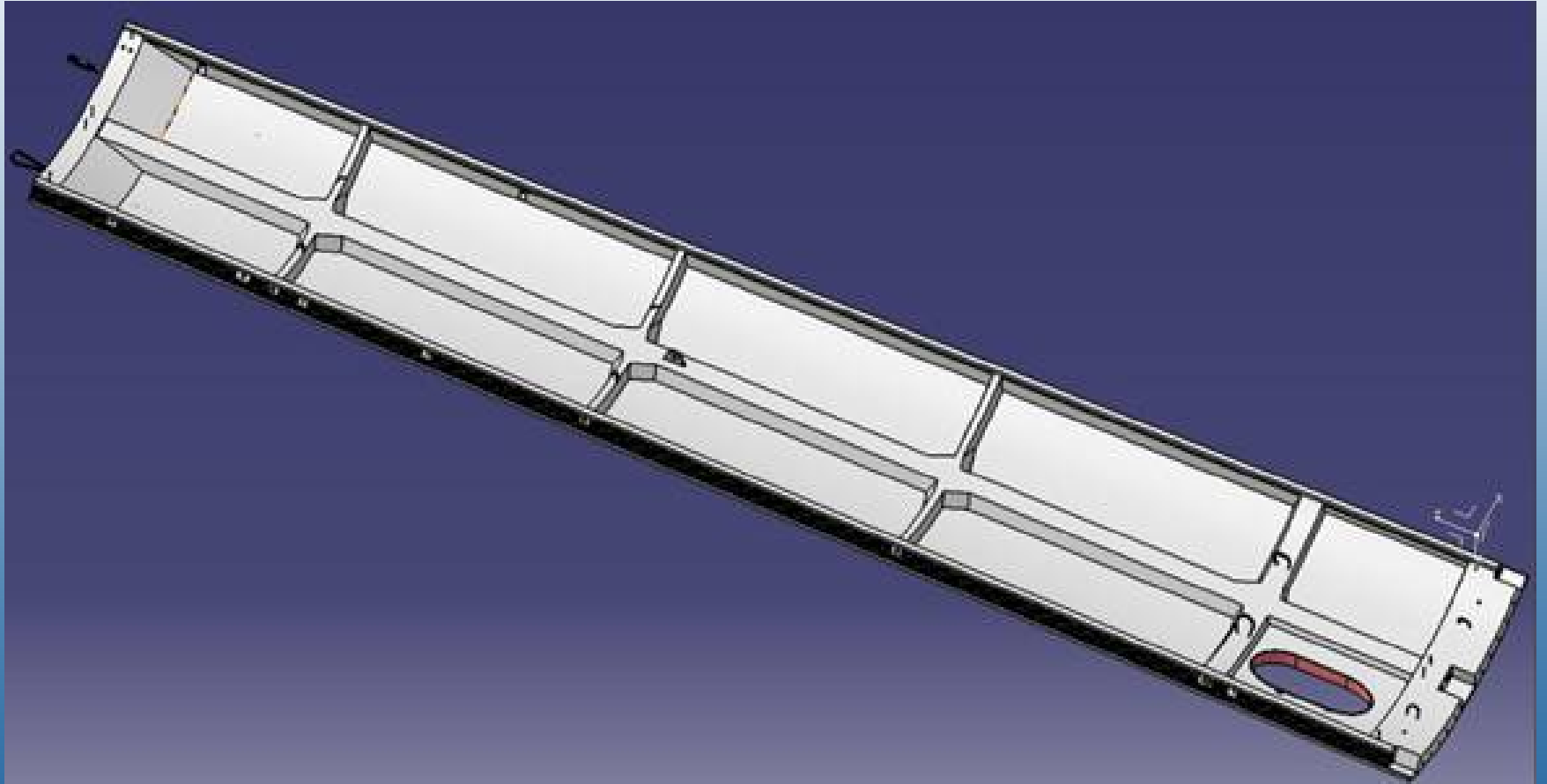
Características máximas suportadas pela estrutura ao longo de sua vida útil. Pelo contrario, no projeto de torres eólicas, os esforços se obtêm a partir de normativas específicas, sendo IEC e DIBt as mais habituais. Não existe uma correspondência direta entre os distintos valores dos esforços segundo estas normas e o que se deve empregar para o dimensionamento de estruturas de concreto. Este aspecto tem sido objeto de controvérsias e debate durante os últimos anos entre os distintos organismos envolvidos e os critérios tem evoluído consideravelmente. A diferença tem uma base lógica, pois numa torre eólica os esforços correspondentes ao peso próprio mais as cargas permanentes (a protensão e o peso do aerogerador) representam uma porcentagem muito pequena dos efeitos máximos, pelo que a adoção do mesmo critério empregado em outro tipo de estrutura seria pouco conservador.

Na atualidade o critério mais geralmente adotado se corresponde com o definido na normativa DIBt 2012 e implica em verificar a descompressão da estrutura com um valor de esforço que somente será ultrapassado em 1% do tempo durante a vida útil desta estrutura, estabelecida habitualmente em 20 anos. A mesma diferença de critério se apresenta na hora de determinar os valores de Esforços frequentes, empregados para o cálculo da abertura máxima de fissura.



MOSCA SUA CHATA, SAIA DAQUI --'

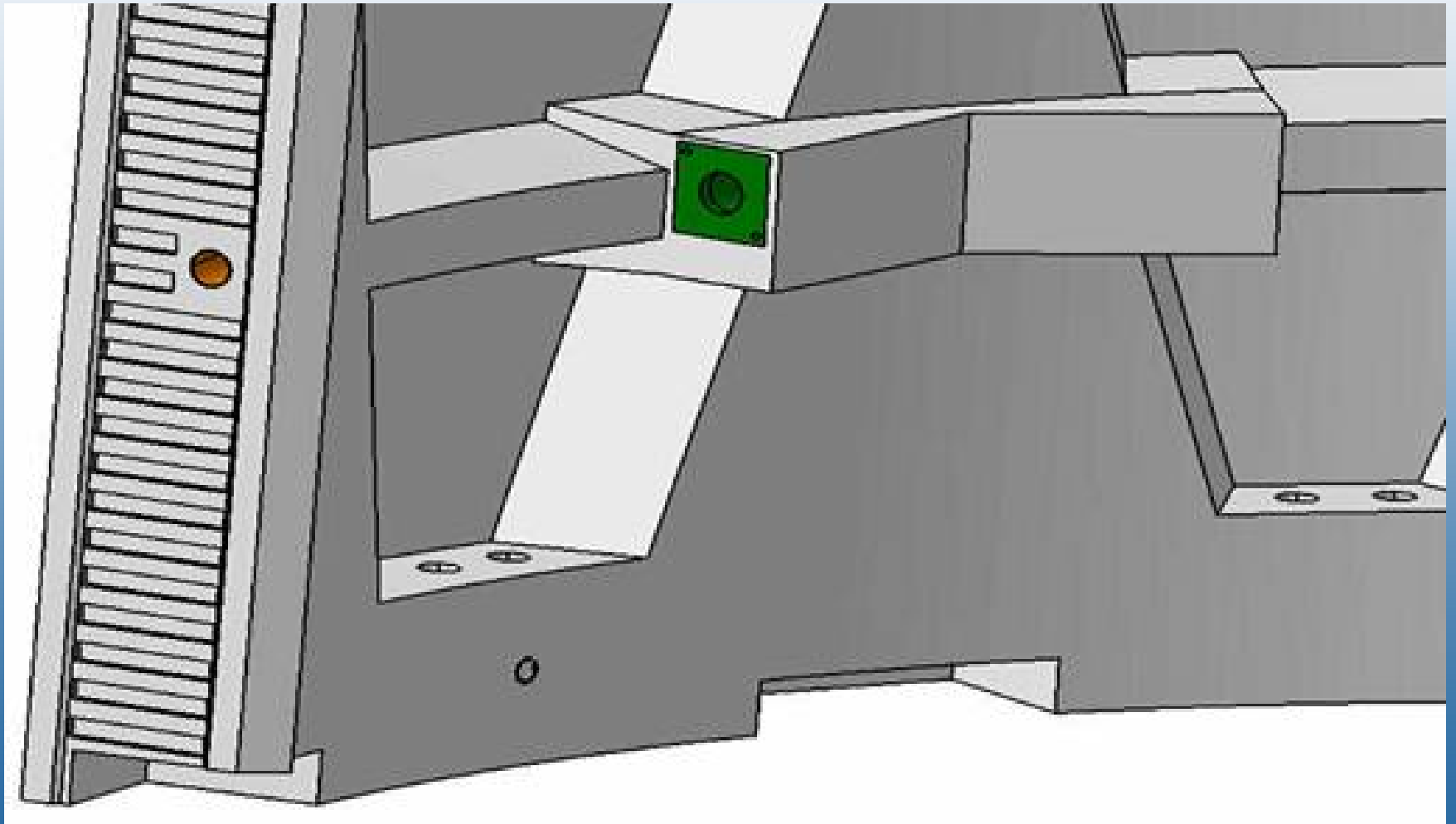
5) Soluções de torres de concreto pré-moldado protendido no mundo

















Diversas Empresas ao longo do mundo tem desenvolvido a solução de suas torres, a medida que a altura destas aumenta, primeiramente em Solução denominada Híbrida, aproveitando do conhecimento e do comportamento das torres metálicas.

Esta forma de solução foi uma primeira tentativa de somar o conhecimento de comportamento dinâmico destas torres metálicas e complementando-as com uma base de concreto estrutural, base esta que confere uma rigidez suficiente para atendimento as Ações Dinâmicas.

Com esta solução desenvolvida pode-se verificar que a construção de parte da torre em concreto estrutural não acarretava dificuldades executivas e que esta parte também podia ser feita em pedaços (aduelas), conduzindo então a solução destas torres feita toda em concreto estrutural.

Nos últimos tempos várias empresas tanto na Europa quanto na China tem caminhado para a aplicação em Torres em Concreto Estrutural com Peças Pré-moldadas, aliando a esta solução a introdução da protensão tanto para o combate as solicitações quanto para a união destas peças pré-moldadas.

Com o desenvolvimento da altura destas torres para valores superiores a 100,0 m esta solução caminha para ser a melhor opção executiva e de custo, principalmente em nosso país, tendo em vista a competitividade da Solução em Concreto.

No presente momento existem diversas soluções em Aduelas de Concreto Pré-moldado sendo desenvolvidas ao longo de todo o mundo, seja a união destas aduelas feita por concretagem in-loco ou predominantemente por colagem por protensão.

6) Soluções no Brasil - protótipo

CANTEIRO DOS PRÉ-MOLDADOS

