



# II WORKSHOP DE **ENERGIAS** OCEÂNICAS E FLUVIAIS

**Avaliação Comparativa da Resistência Estrutural de  
Torres Convencionais e Torres Sandwich do Tipo  
SHCC para Turbinas Eólicas Off-Shore.**

Dr. John Alex Hernández Chujutalli.

29 de Agosto.

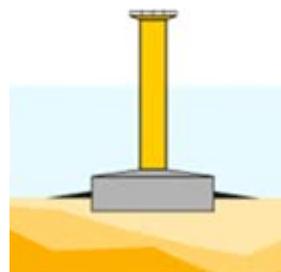
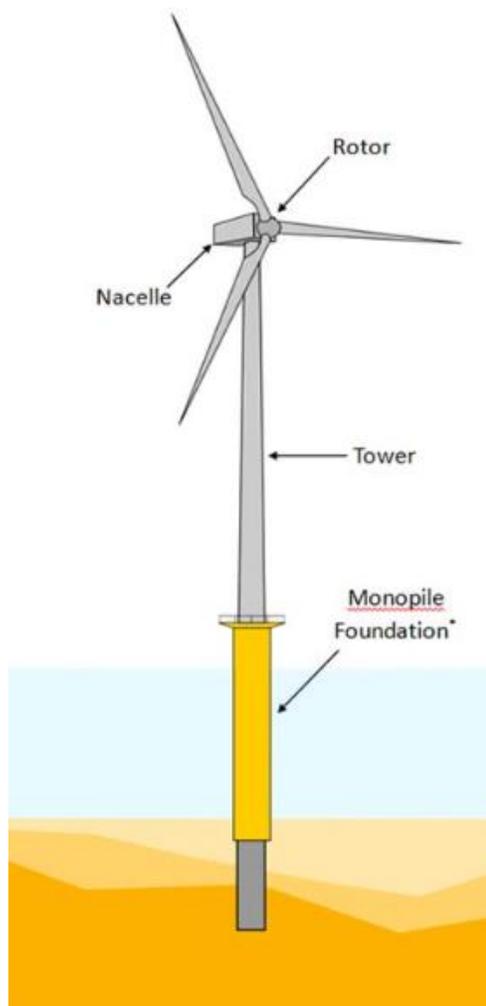
Itajubá – Minas Gerais

## Turbinas Eólicas Offshore

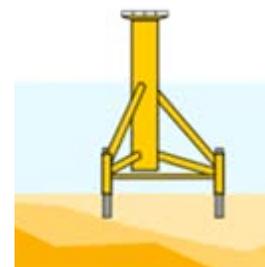


Nos últimos anos, na procura de uma maior produção competitiva de eletricidade, a energia eólica *offshore* está sendo considerada como alternativa em crescimento no panorama da energia global, devido ao maior potencial do vento no mar a distâncias mais afastadas da costa.

## Turbinas Eólicas Offshore



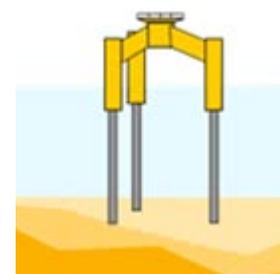
**Base de Gravidade**



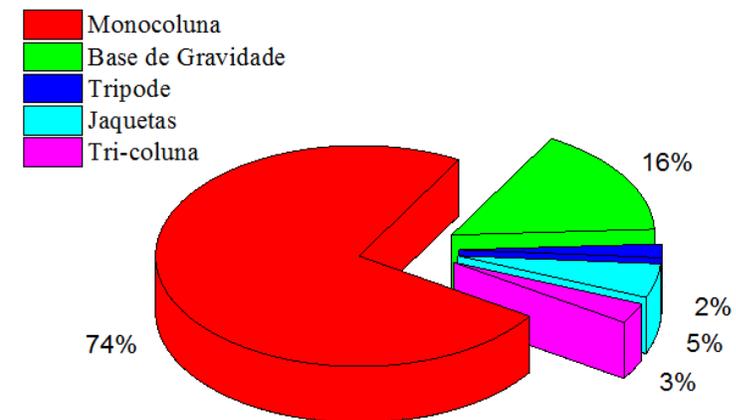
**Tripode**



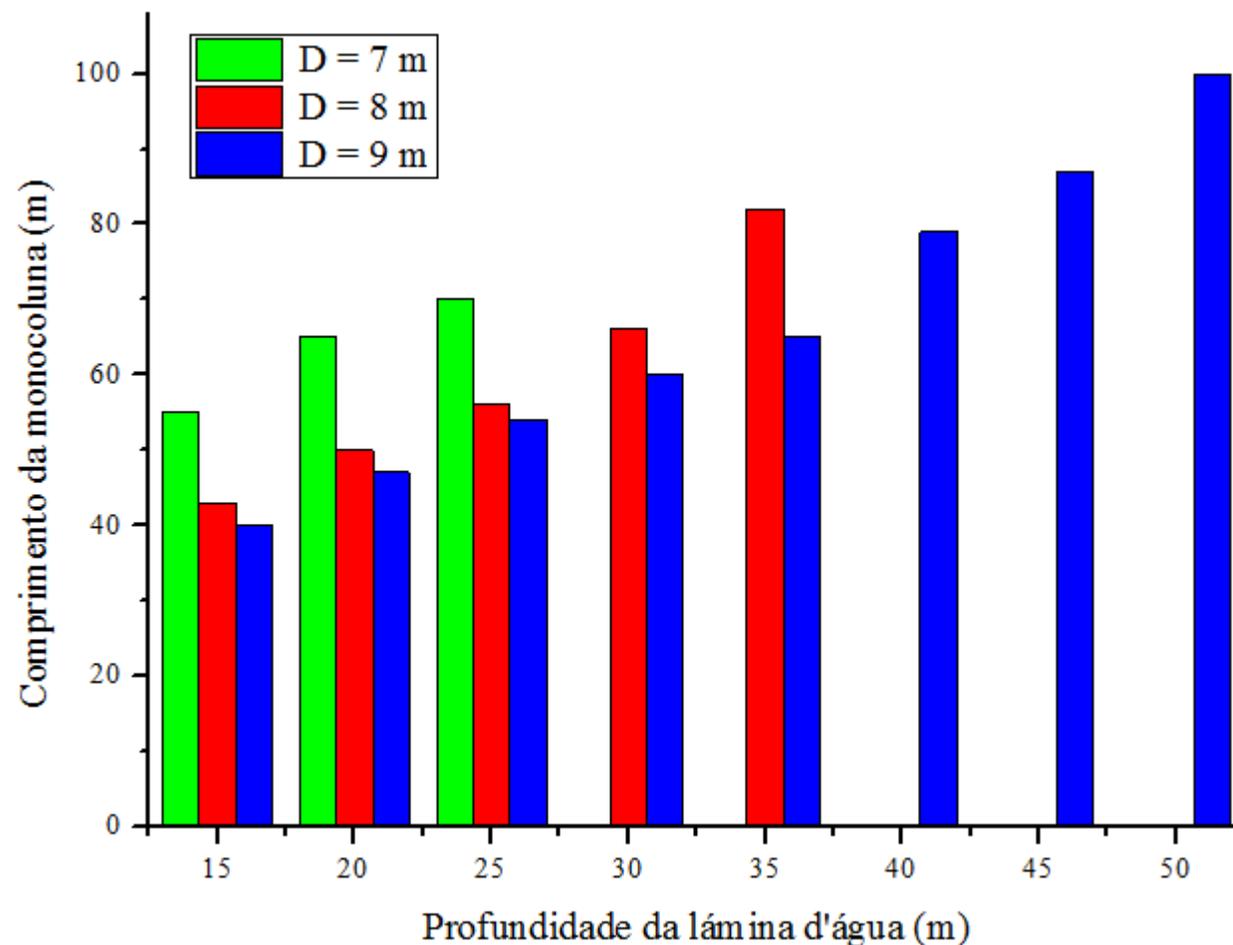
**Jaquetas**



**Tri-colunas**



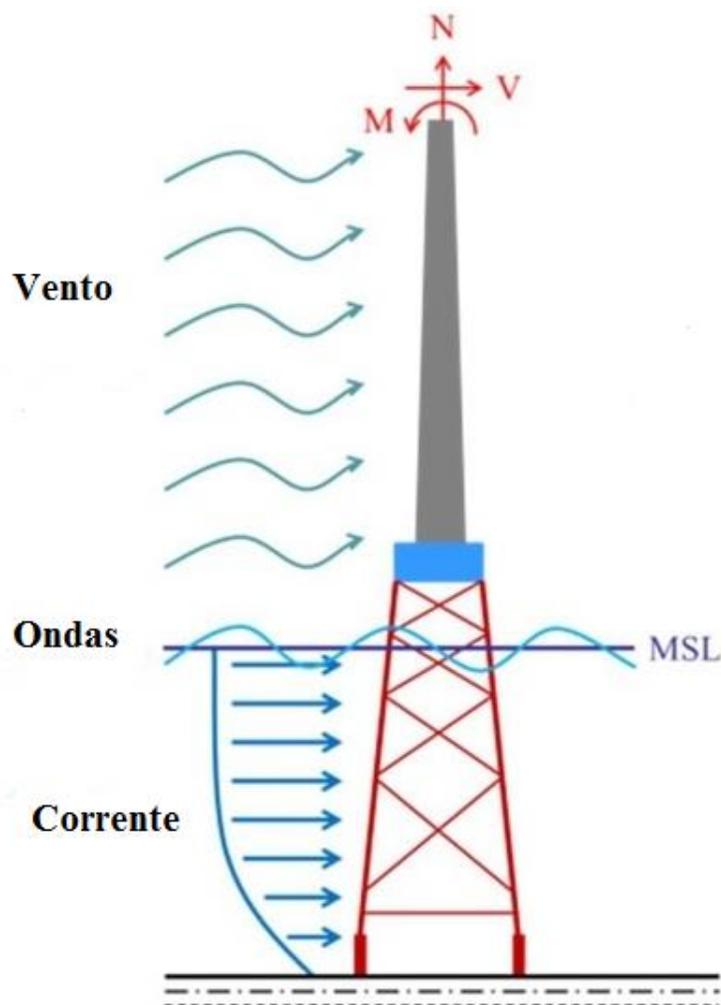
## Turbinas Eólicas Offshore



**Comprimento das monocolunas para uma turbina eólica de 8 MW**

Incrementando diâmetro, se incrementaria a espessura das torres.

## Turbinas Eólicas Offshore



A **ação do vento** atua na torre e no rotor causando esforços aleatórios em ambos.

A **ação das ondas** age na fundação, assim como na peça de transição, gerando esforços de natureza aleatória.

A ação do vento e da onda podem causar desprendimento de vórtices na estrutura, originando vibrações sobre esta.

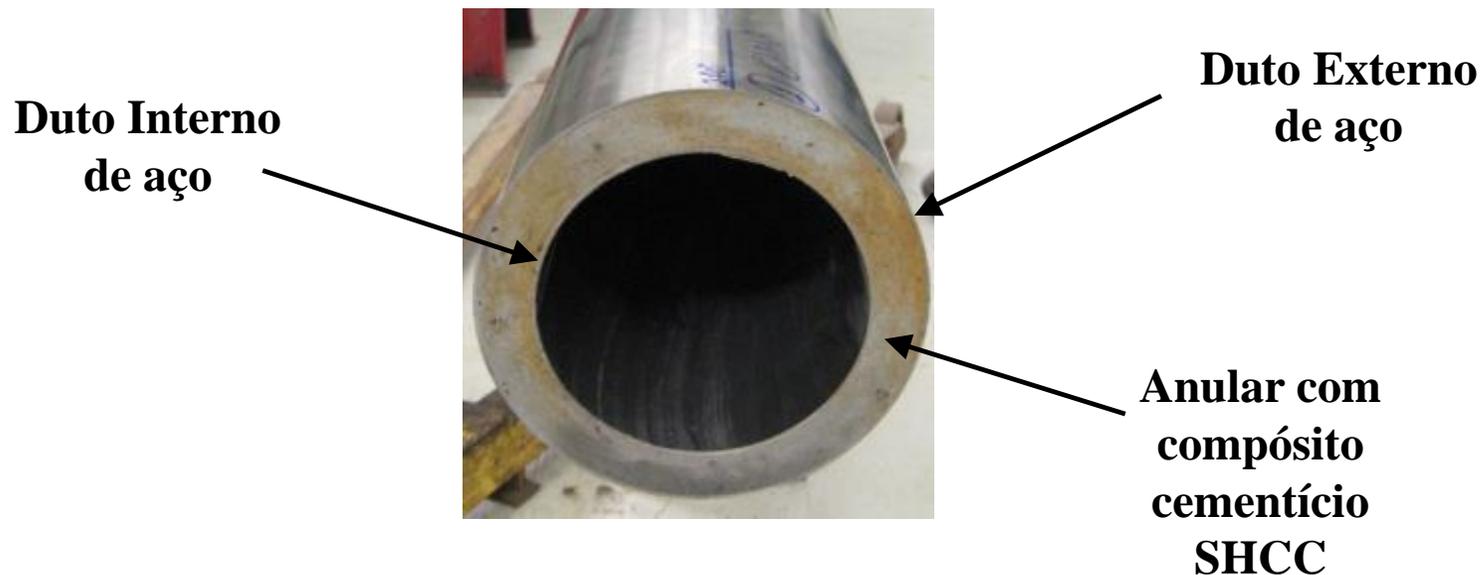
As torres devem ser projetadas para resistir todos os carregamentos combinados durante seu tempo de serviço. Seu próprio peso gera carregamentos axiais, enquanto o vento e as ondas geram cargas torcionais, cargas laterais e momentos fletores sobre o suporte, o que define o projeto da torre.

## Duto Sandwich com SHCC

### *Estrutura alternativa para a Torre*

**Objetivo:** Reduzir o custo de fabricação e de instalação, capazes de resistir os carregamentos ambientais severos e próprios da turbina eólica.

Dutos sanduíche com SHCC (*strain-hardening cementitious composites*), com inclusão de fibra polimérica.



## Duto Sandwich com SHCC



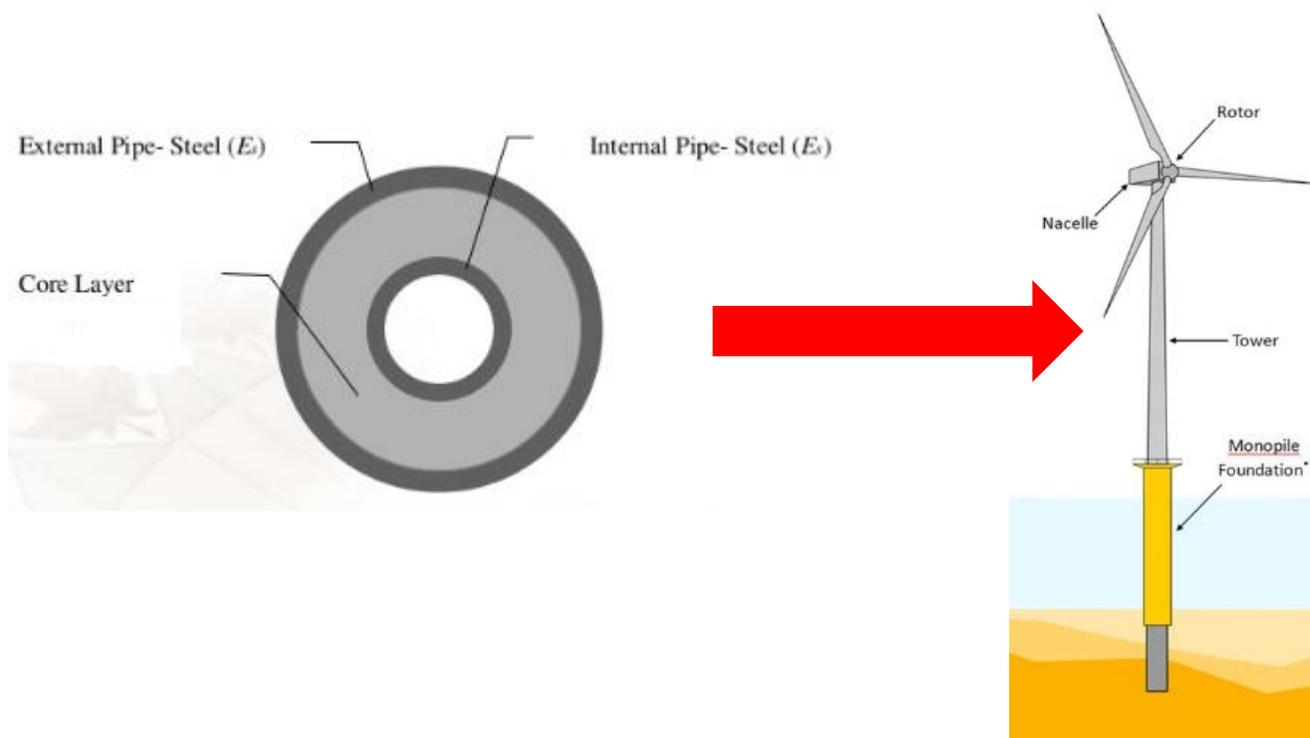
O duto sandwich com SHCC tem sido estudado no **Laboratório de Tecnologia Submarina( LTS)** da COPPE/UFRJ, para seu uso como duto submarino para o transporte de petróleo.

**Testes experimentais de flexão e flexão inversa** relacionados ao processo de instalação pelo método do carretel (*reel-lay*).

Boa resistência aos carregamentos de flexão e tração.

## Objetivo

O objetivo principal do projeto de pesquisa é realizar análises estruturais da resistência última das torres das turbinas eólicas, comparando a utilização do material convencional (aço) com o tubo sanduíche (aço nas camadas externa e interna com anular de SHCC).

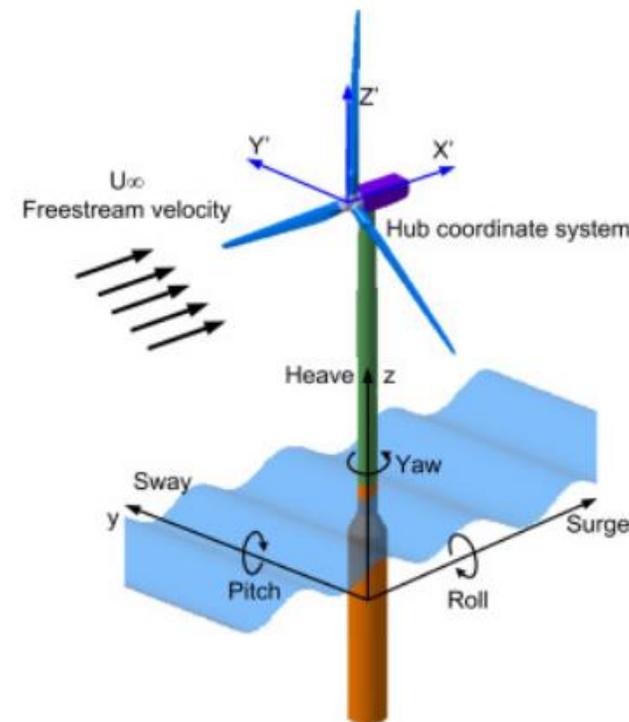


## Referência – Turbina Eólica Offshore de 5 MW

Para a comparação foi usada a turbina eólica offshore de 5 MW desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL).

### Propriedades Gerais da Turbina Eólica de Base NREL

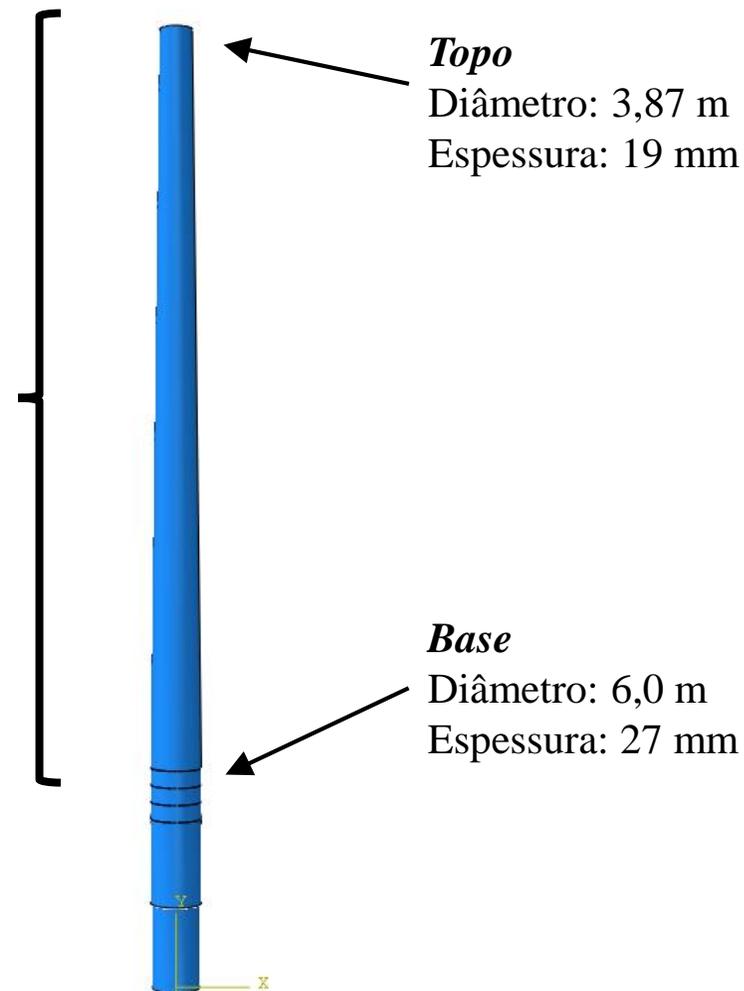
Potência Nominal	5 MW
Orientação do rotor, Configuração	<i>Upwind</i> , 3 pás
Controle	Velocidade Variável
Rotor	126 m
Diâmetro do Cubo	3 m
Altura do Cubo	90 m
Veloc. do Vento: partida, nominal, deslig. (m/s)	3,0; 11,4; 25,0
Veloc. do rotor: partida, nominal (rpm)	6,9; 12,1
Massa do Rotor (kg)	110.000
Massa da Nacele (kg)	240.000



## Referência – Turbina Eólica Offshore de 5 MW

### Propriedades Gerais da Torre Convencional

Altura da Torre	87,6 m
Massa Total Integrada	350,000 kg
Localização do CM	38,234 m
Relação de Amortecimento	1 %
Diâmetro Externo na Base	6 m
Espessura da Base	0,027 m
Diâmetro Externo no Topo	3,87 m
Espessura no Topo	0,019 m
Módulo de Elasticidade (E)	210 GPa
Densidade do Aço (Efetivo)	8500 kg/m <sup>3</sup>

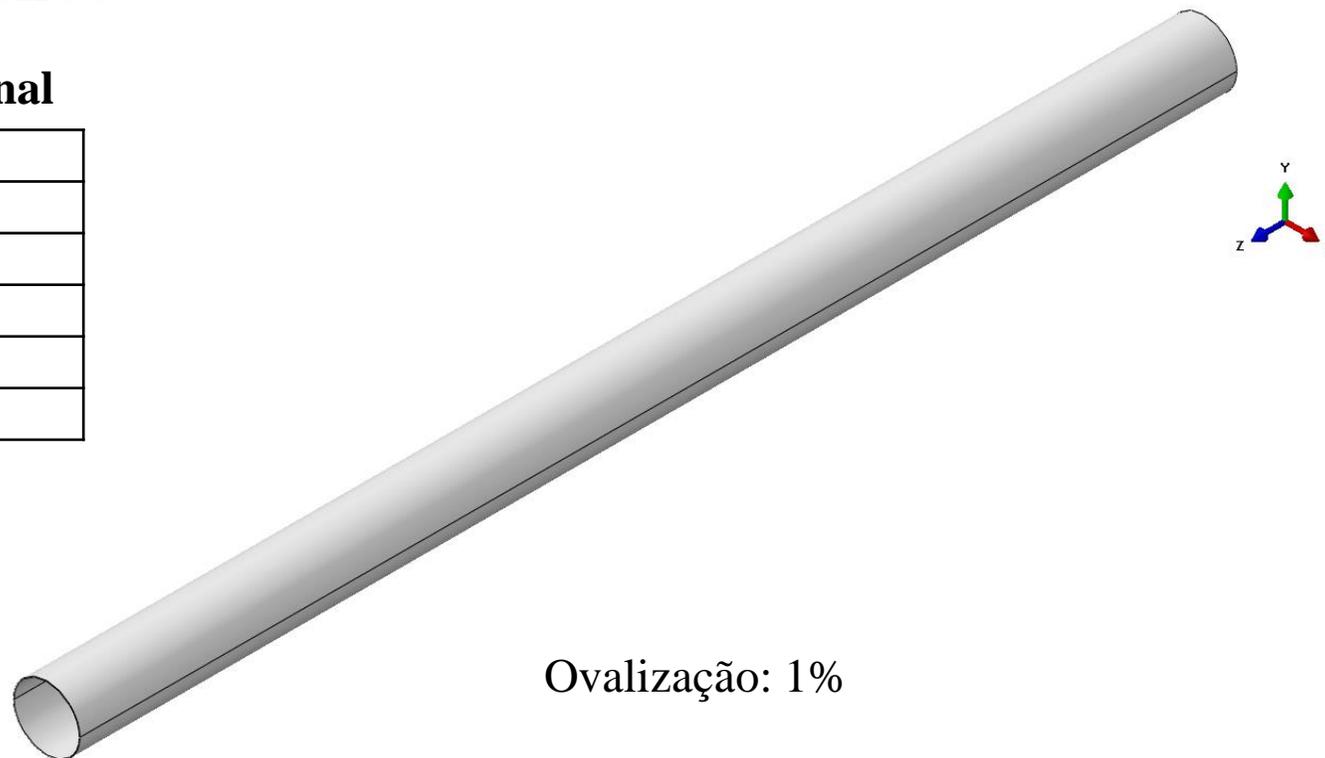


## Modelagem Numérica da Torre

### *Geometria da Torre - Duto Sandwich com SHCC*

### Propriedades Gerais da Torre Convencional

Altura da Torre	87,6 m
Massa Total Integrada	Variável
Diâmetro Externo na Base e Topo	5 m
Espessura da Base	Variável
Módulo de Elasticidade - SHCC	20 GPa
Densidade do SHCC	1830 kg/m <sup>3</sup>



## Modelagem Numérica da Torre

### *Material da Torre - Duto Sandwich com SHCC*

Aço :

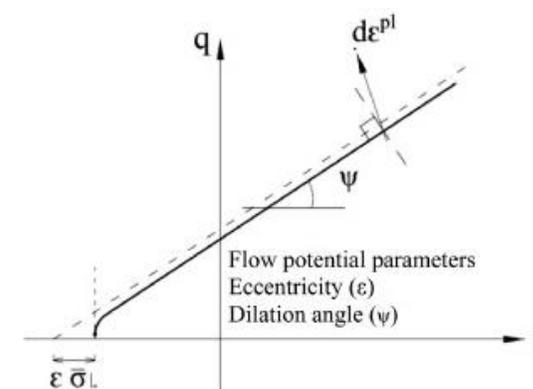
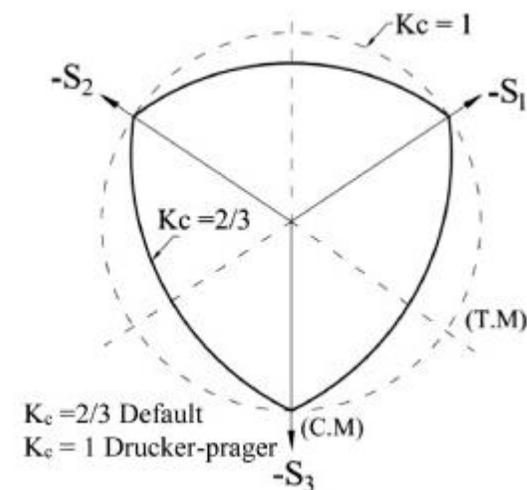
Tensão de escoamento = 355 MPa

Módulo de elasticidade = 210 GPa.

### **Modelo: Damaged Plasticity Model**

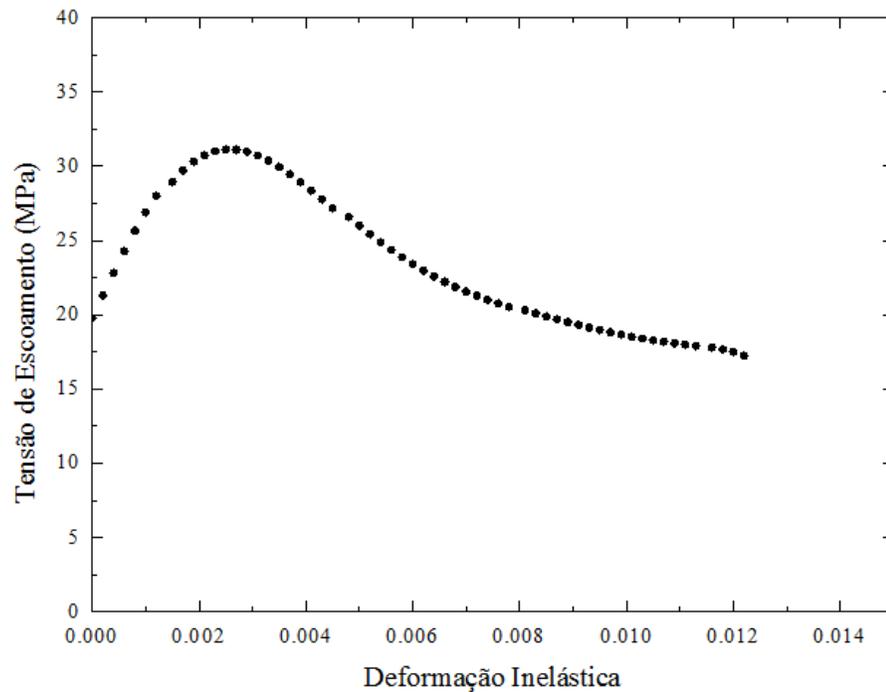
#### *Parâmetros Característicos do Concreto com SHCC*

Parâmetros	Valores
Densidade	1800 (kN/m <sup>3</sup> )
Coeficiente de Poisson	0,2
Ângulo de Dilatação	31 °
Excentricidade do Potencial de Fluxo	0,1
Relação biaxial/uniaxial inicial	1,16
Parâmetro de Forma	2/3
Parâmetro de Viscosidade	0



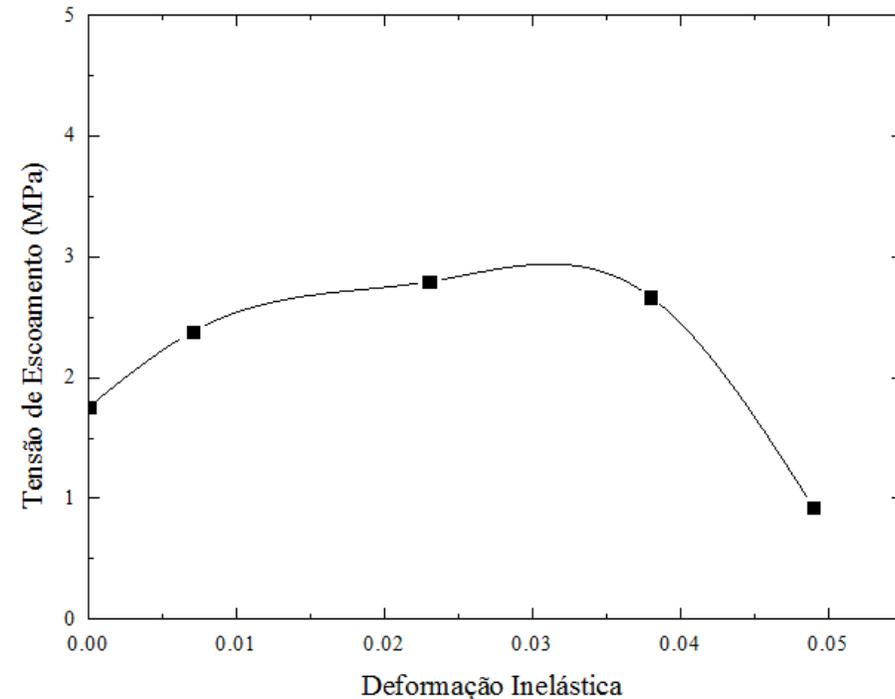
## Modelagem Numérica da Torre

### Comportamento à Compressão



Curva Tensão de Escoamento versus Deformação Inelástica

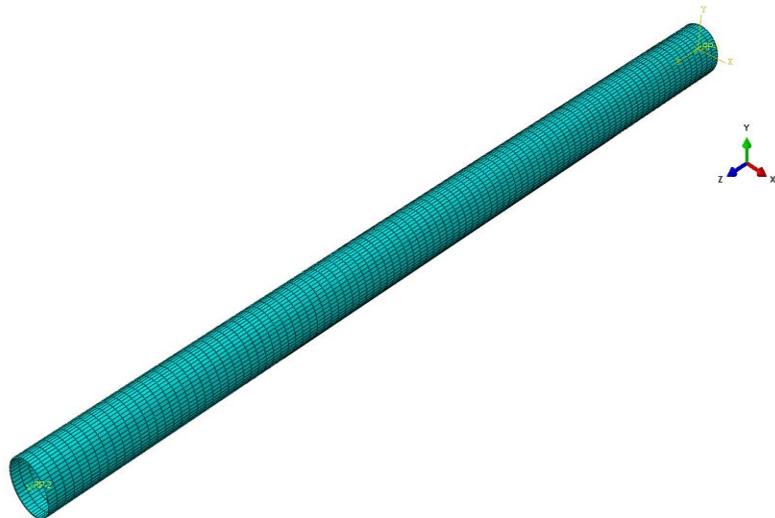
### Comportamento à Tração



Curva Tensão de Escoamento versus Deformação por Trincas

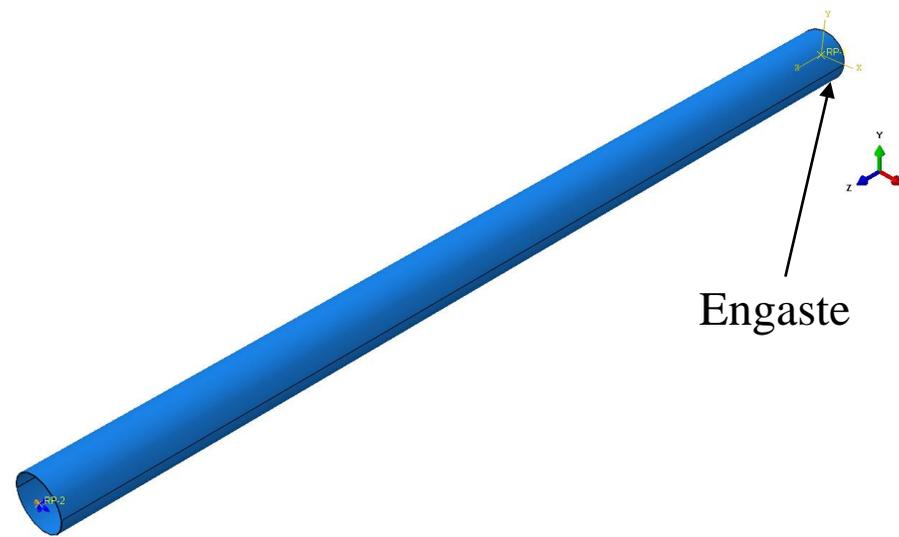
## Modelagem Numérica da Torre

### *Malha do Modelo Numérico e Condições de Contorno*



Tipo de Elementos:  
**C3D8RH**

Elementos cúbicos  
lineares de 8 nós



Aplicação da rotação

\*Considerando a ovalização

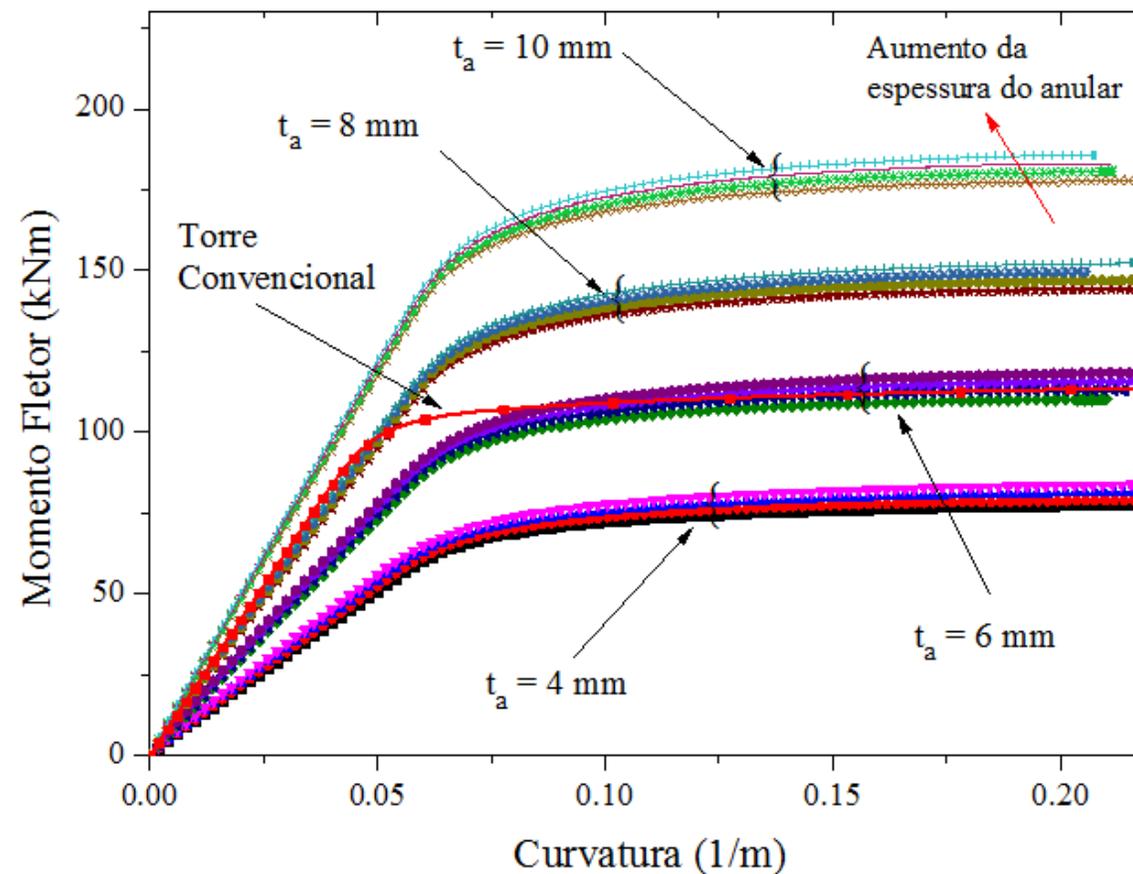
## Estudo Paramétrico do Duto Sandwich com SHCC

**Diâmetro do Duto Externo:**  
5 m

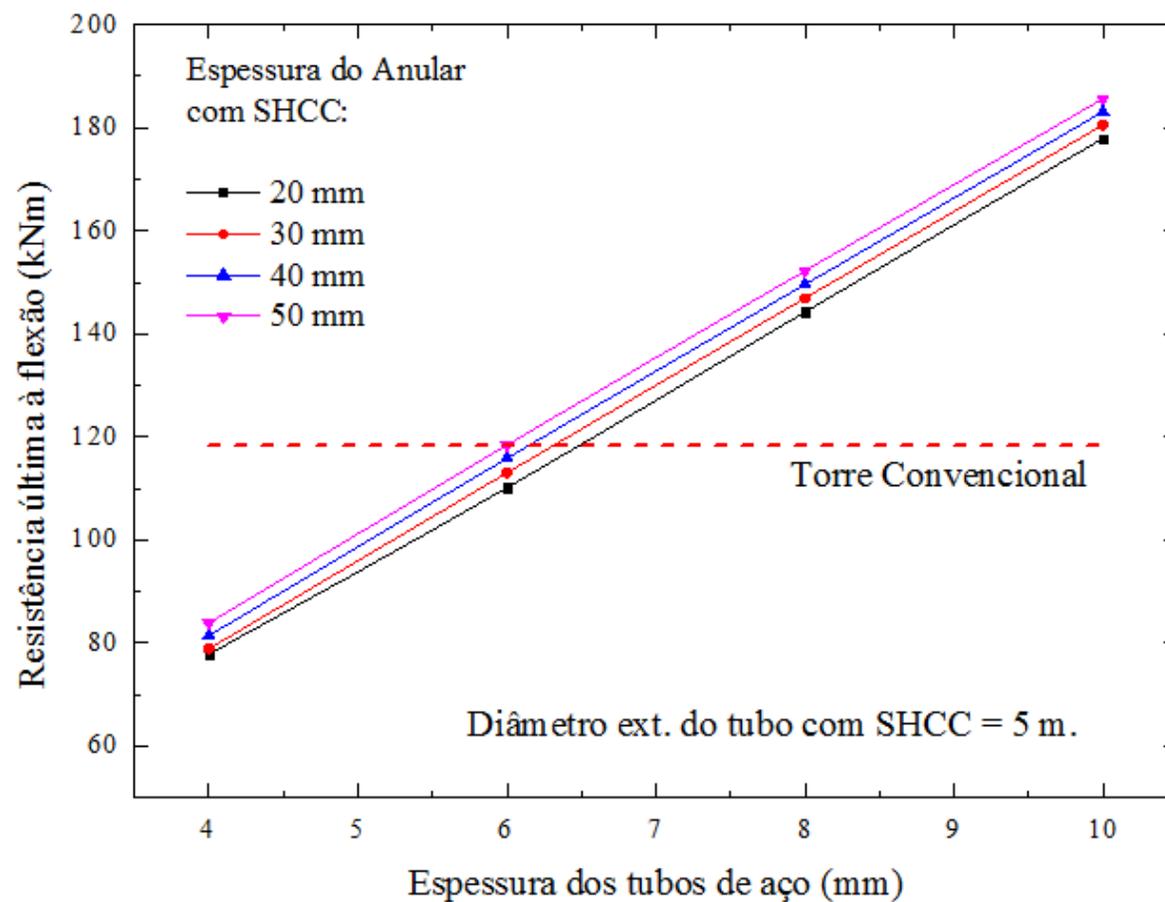
**Espessuras do Duto Externo :**  
4, 6, 8 e 10 mm

**Espessuras do Anular de SHCC:**  
20, 30, 40 e 50 mm

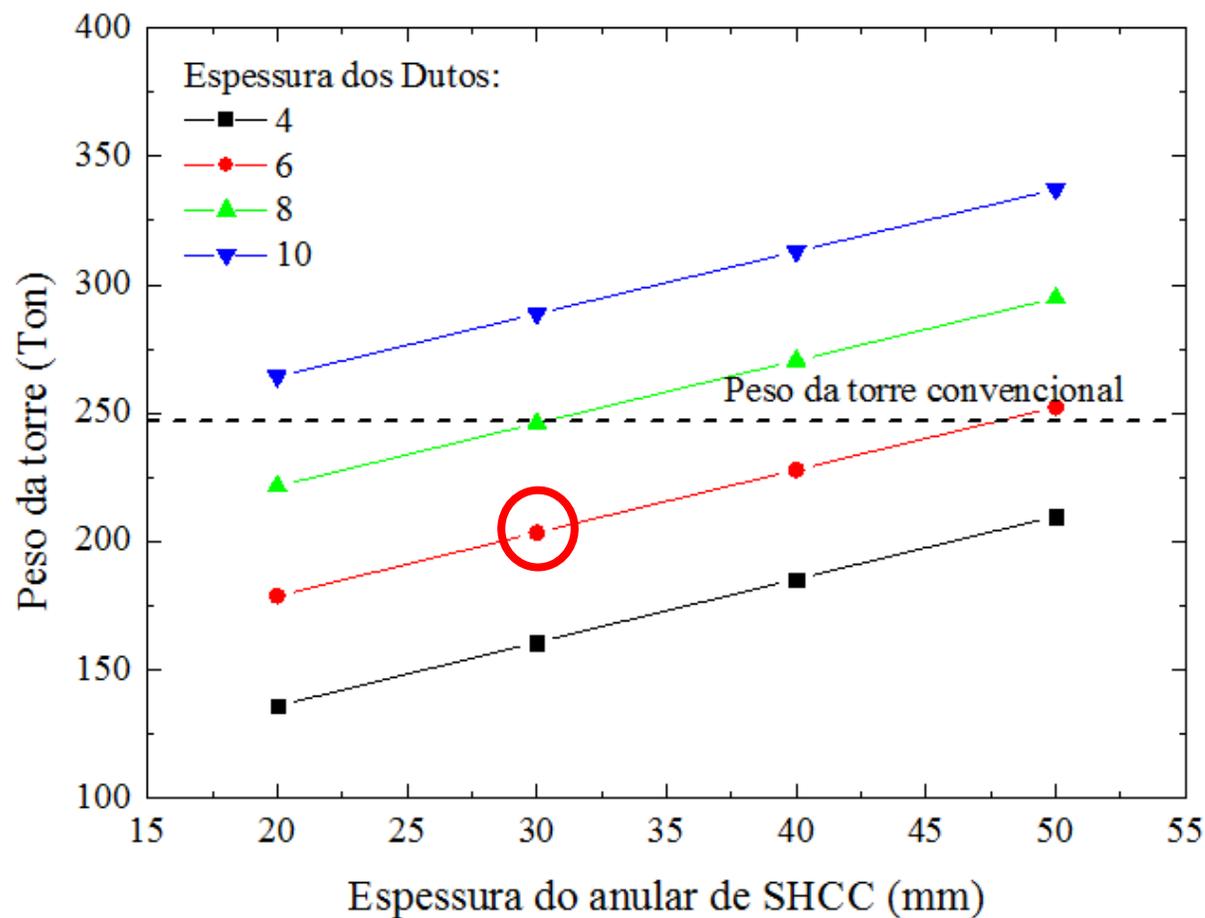
**Espessuras do Duto Interno:**  
4, 6, 8 e 10 mm.



## Resistência última à flexão



## Comparação dos Pesos

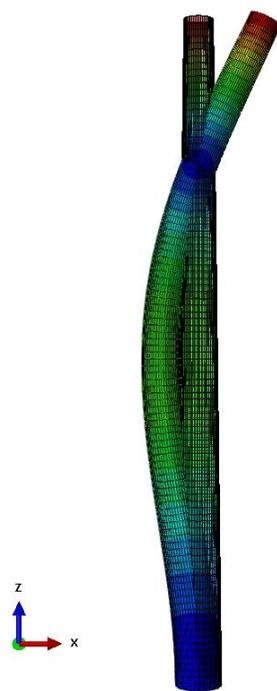


\* Otimização dos dutos Sandwich ainda é possível

## Modos e frequências naturais das Torres

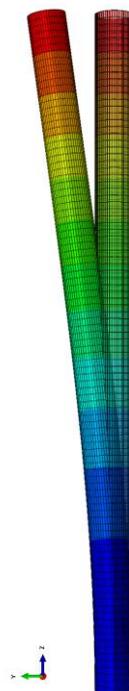


1º Modo

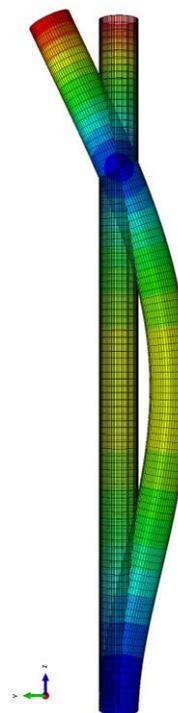


3º Modo

Torre Convencional



1º Modo



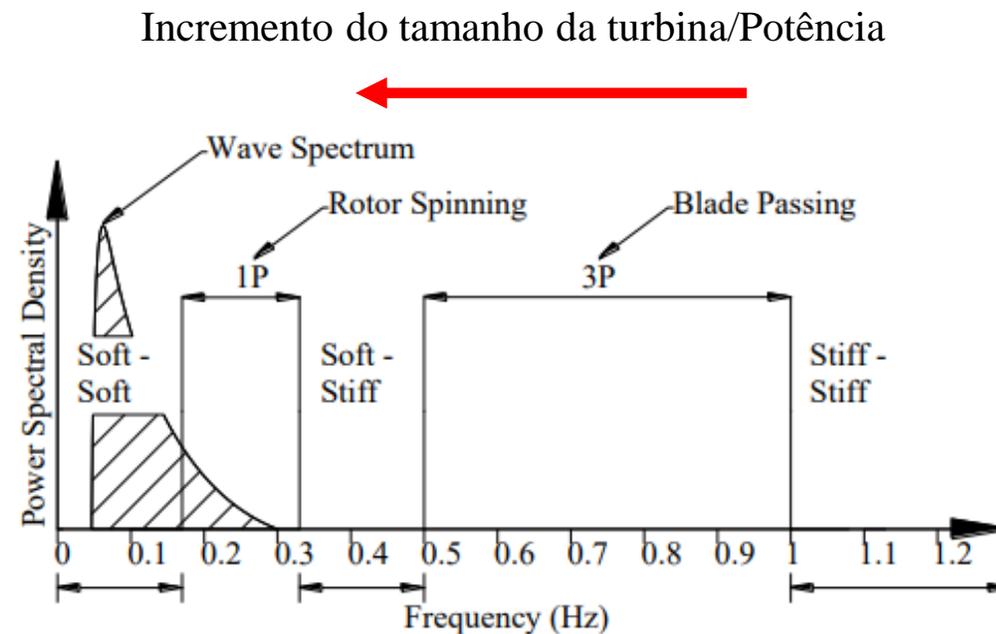
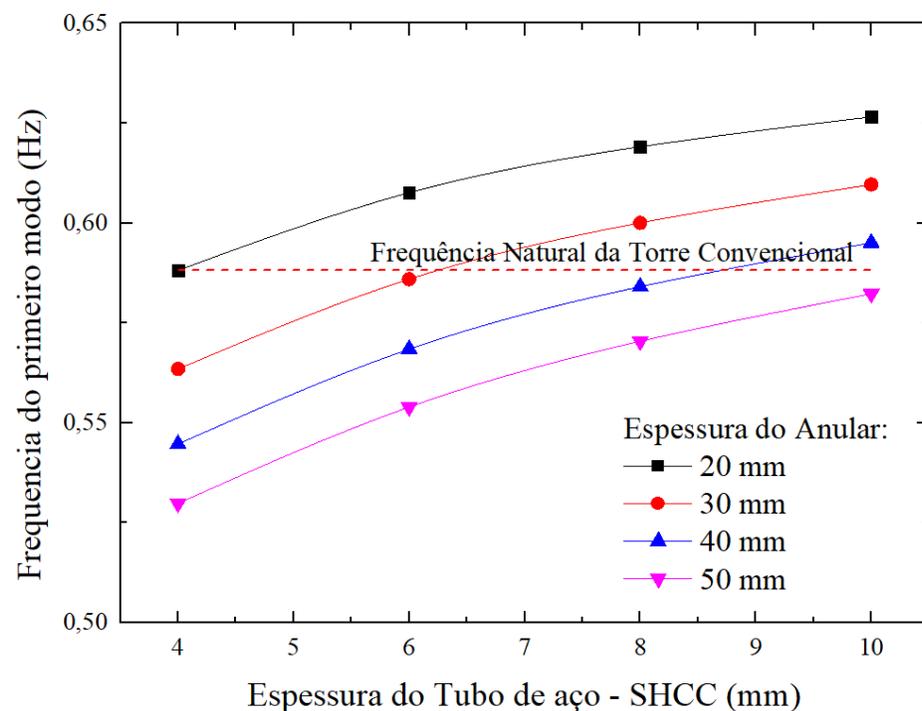
3º Modo

Torre - Duto Sandwich

Considera-se que a estrutura da seção transversal do sandwich é maior do que a seção transversal do aço. As oscilações de uma turbina eólica podem amortecer muito melhor com uma seção de torre sandwich.

## Modos e frequências naturais das Torres

Evitar a ressonância e os danos por fadiga.



Turbinas eólicas modernas geralmente apresentam um sofisticado sistema de controle de inclinação projetado para evitar a faixa de frequência rotacional que causaria ressonância na estrutura.

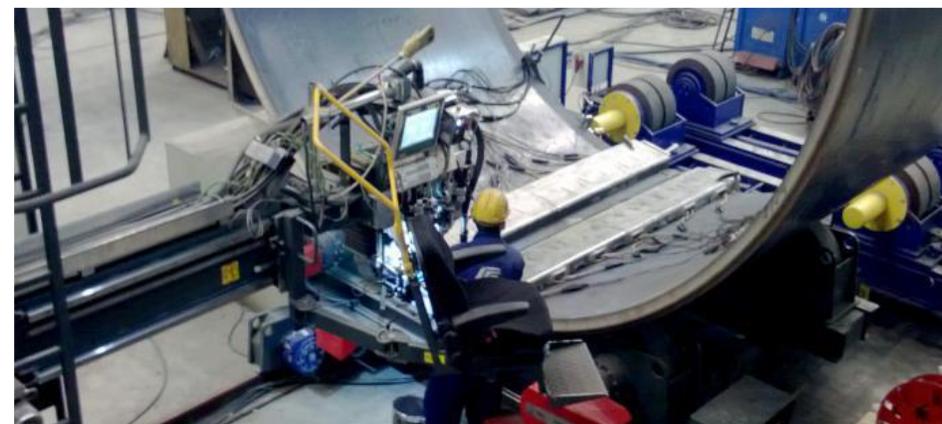
## Tecnologia de manufatura

As limitações são resumidas ao calandragem das chapas e à soldagem.

Dutos de maiores diâmetros precisam de equipamentos de maior capacidade para a manufatura.

*Uso de tubos finos → menor tempo de soldagem.*

*Menor número de soldas → minimiza a falha por fadiga.*



---

## Conclusões

A resistência estrutural das torres de uma turbina eólica offshore com material convencional e com material SHCC foram avaliadas e comparadas.

Um estudo paramétrico realizado determinou que a resistência última à flexão da torre com SHCC, mudando as espessuras dos tubos de aço e a espessura do anular, possui uma boa relação resistência/peso tanto quanto a torre convencional sem seus parâmetros serem otimizados.

O material anular do SHCC pode ter um papel fundamental e decisivo no momento de determinar frequência natural da estrutura da turbina eólica.

O uso do material SHCC na torre convencional pode otimizar os custos durante a fabricação, transporte e instalação das torres.

*Obrigado !!!!*