



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS  
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

## Base de Aerogeradores: Comparativo de Dimensionamento Modelo MEF e Modelo Biela/Tirante

André Puel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFSC Instituto Federal de Santa Catarina / Departamento Acadêmico da Construção Civil /  
puel@ifsc.edu.br

### Resumo

Apesar de o Brasil possuir um território vasto com ótimo potencial de geração de energia elétrica utilizando o vento, o Brasil ainda produz pouca energia a partir desta fonte. Por conta disto, o Brasil está investindo forte na ampliação de parques eólicos, surgindo a necessidade de expandir os estudos na área. As fundações dos aerogeradores são um tipo especial de estrutura devido aos seus casos de carregamento, geometrias e limites de projeto. Ainda se tem muitas dúvidas sobre qual é o modelo que melhor representa o comportamento da base. Este artigo apresenta um comparativo entre o dimensionamento de bases para aerogeradores em concreto armado, formato circular, com diâmetro de 14 metros, apoiadas sobre estacas do tipo Hélice Contínua com 70cm de diâmetro. Serão contemplados nesse comparativo dois modelos, ambos analisados no programa SAP 2000, um contendo elementos sólidos analisado pelo MEF e o outro contendo elementos de barra, analisado por Biela/Tirante. A análise dos resultados mostrou que a idealização de um Modelo Biela-Tirante em uma treliça plana apresenta resultados satisfatórios quando comparado com o Modelo Tridimensional em Elementos Sólidos, modelo este completo e sofisticado.

### Palavras-chave

Aerogerador ; energia eólica ; fundação ; elementos finitos ; biela/tirante

### Introdução

Um parque eólico é composto por várias torres (que podem ser metálicas ou em concreto-armado), sendo essas torres apoiadas ao solo por meio de uma base em concreto armado, podendo ser fundações diretas ou profundas. Essas bases geralmente são circulares, mas podem ter formatos diferentes.

Nesse trabalho será abordado um estudo comparativo entre o dimensionamento de bases para aerogeradores em concreto armado, formato circular, com diâmetro de 14 metros, apoiadas sobre estacas do tipo Hélice Contínua com 70cm de diâmetro. Serão contemplados nesse comparativo dois modelos, ambos analisados em um *software* estrutural, a citar:

a) **Modelo 01:** modelo tridimensional, analisado em elementos do tipo Sólido (elementos *SOLID* de oito nós com modos incompatíveis) pelo Método dos Elementos Finitos;

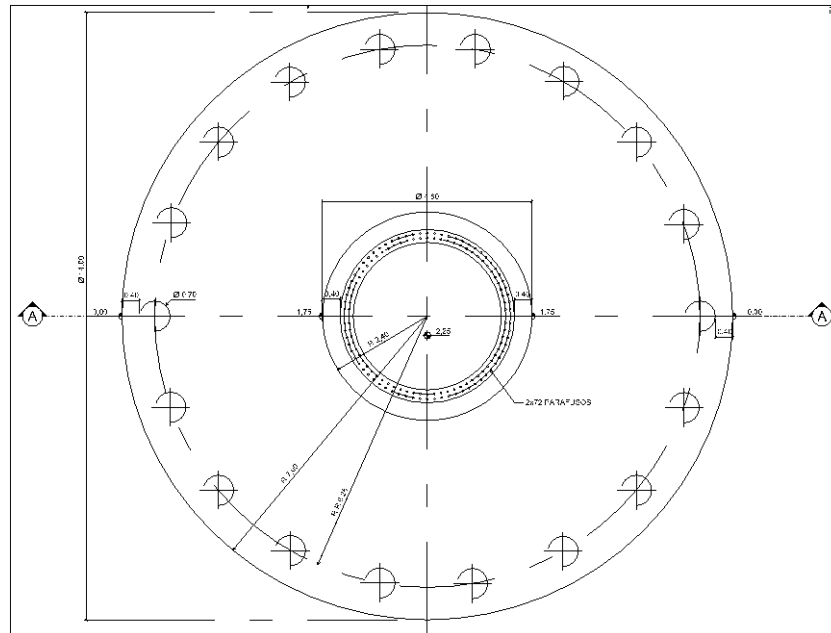
b) **Modelo 02:** modelo Biela-Tirante, analisado em elementos de barra do tipo *FRAMES*.

Ao final, os resultados serão comparados em termos de Área de Aço calculadas tanto para o Modelo 01 como do Modelo 02. Além disso, para o Modelo 02 serão realizadas as

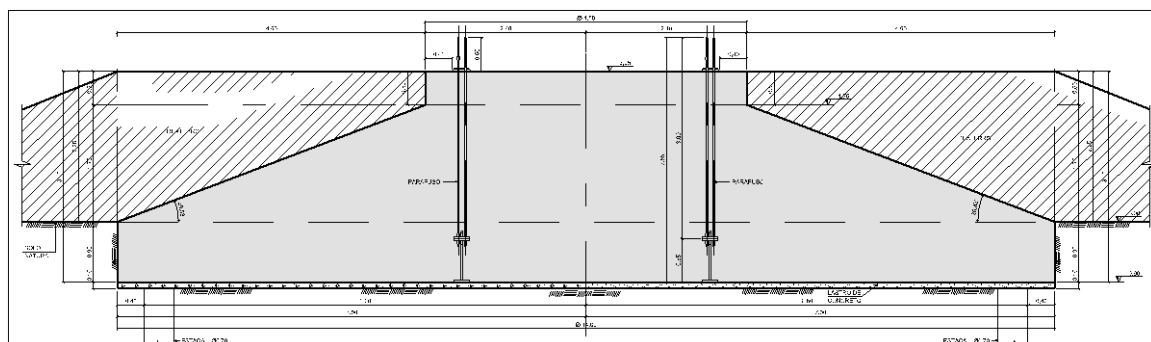
verificações de tensão de compressão nas Bielas, no Modelo 01, serão realizadas as verificações de compressão no concreto.

O programa computacional SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES, 2016) foi adotado como ferramenta auxiliar para desenvolvimento do trabalho.

## Geometria



**Figura 1 – Base vista em planta**



**Figura 2 – Corte A**

**Tabela 1 – Resumo da geometria do modelo adotado**

Diâmetro da Base	Altura total	Estacas	Parafusos protendidos	Volume da base
14 metros	3,15 metros	18 $\phi$ 70cm	2x72	280 m <sup>3</sup>

Observação: a mesma geometria foi utilizada tanto o modelo 01 como para o modelo 02.



## Materiais

A tabela 2 apresenta as propriedades adotadas para cada material presente na fundação. Foi utilizado o *Sistema Internacional* como sistema de unidades (m, kN, MPa).

**Tabela 2 – Resumo dos materiais.**

Concreto	Aço CA-50	Aço AISI 4140	Reaterro
$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$f_{yk} = 420 \text{ MPa}$	$\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ kN/m}^3$
$E_{cs} = 26.071 \text{ MPa}$	$E_s = 210.000 \text{ MPa}$	$E_s = 200.000 \text{ MPa}$	
$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$	

## Carregamentos

### *Cargas devido ao aerogerador*

A tabela 3 apresenta os carregamentos provenientes da torre do aerogerador para a fundação.

**Tabela 3 – Cargas devido ao Aerogerador já majoradas pelo coeficiente de segurança**

$\gamma_f$ (-)	$F_{\text{horizontal}}$ (kN)	$F_{\text{vertical}}$ (kN)	$M_{\text{tombamento}}$ (kN.m)	$M_{\text{torsor}}$ (kN.m)
1,4	747	2496	59000	760

*Reaterro:* Foi considerado o aterro atuante na face superior.

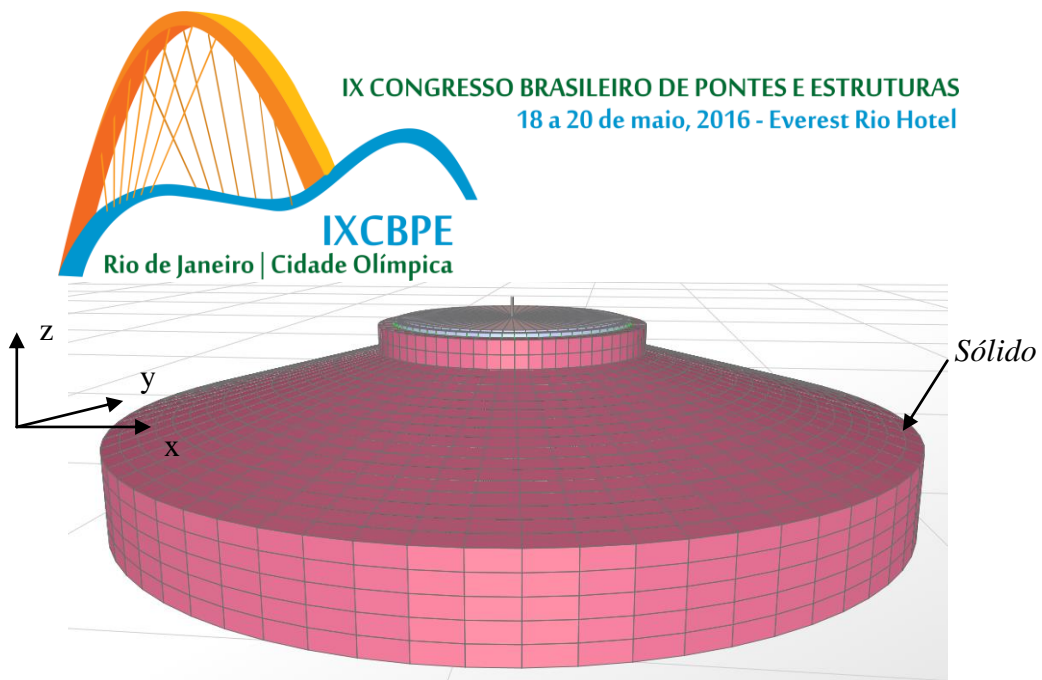
*Protensão:* A ligação entre a torre e a fundação foi concebida com a utilização de parafusos protendidos. A protensão dos parafusos de ancoragem foi considerada como uma deformação inicial na barra, resultando numa tração de 599 kN em cada parafuso.

**Casos de Carregamento:** Será analisado somente um caso crítico de carregamento:

*ELU\_My:* 1,4 Peso Próprio + 1,4 Reaterro + 1,4 Aerogerador + 1,0 Protensão

## Descrição dos modelos adotados

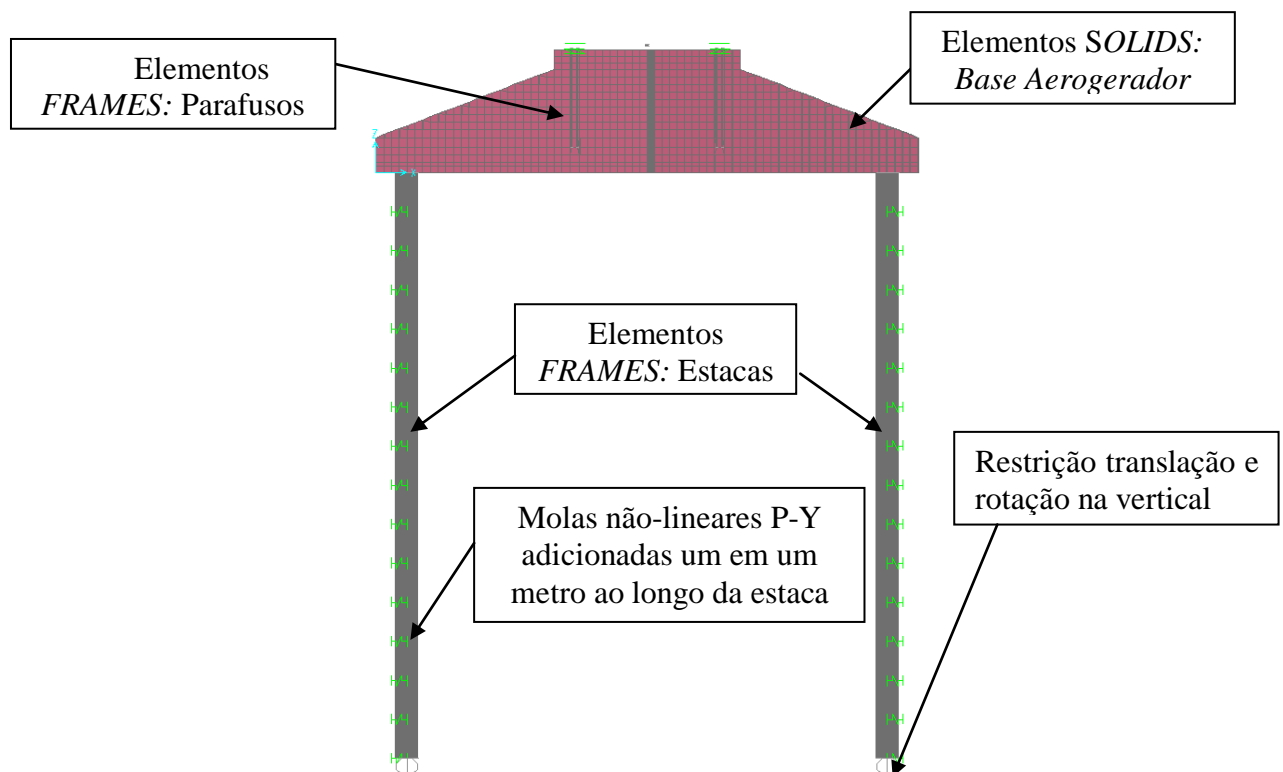
*Modelo 01 – idealizado em elementos Solids:* A estrutura foi analisada com auxílio do programa SAP2000. Foram utilizados elementos tipo casca (elementos tipo *Shell* de quatro nós), tipo sólido (elementos *Solid* de oito nós com modos incompatíveis), elemento de barra (elementos tipo *Frame*) e elementos de contato.



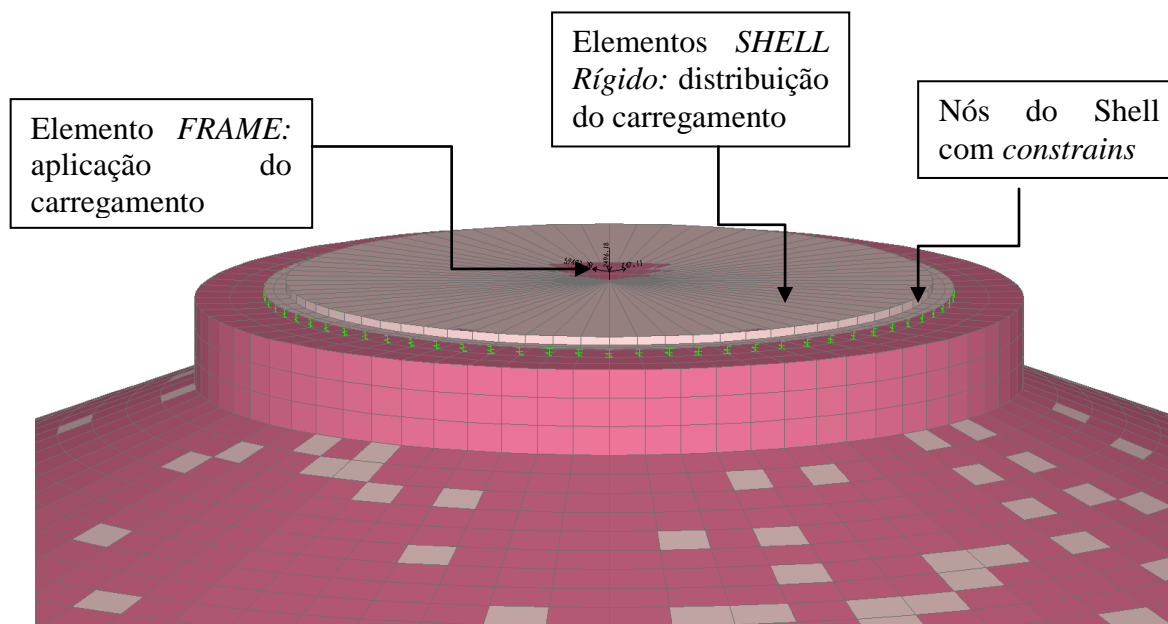
**Figura 3 – Modelo numérico SAP2000 – Tridimensional**

Como condição de contorno considerou-se 18 estacas com diâmetro igual a 70,0 cm, profundidade de 15 metros, de acordo com as sondagens no local. A interação solo-estrutura foi modelada com a utilização de molas não-lineares do tipo P-Y com a rigidez do solo de acordo com o perfil da região. Para cada metro do perfil geológico calcularam-se as curvas P-Y de acordo com as recomendações da DNV/Riso (2002) (Figura 4).

O carregamento foi inserido em uma barra rígida localizada no centro da base e distribuído por elementos *Shell* rígidos até o ponto de aplicação da carga, localizada no contorno da haste do Aerogerador. Para uniformizar os deslocamentos dessa placa rígida, aplicando-se um comportamento de corpo rígido, utilizou-se *Constrains* nos nós da placa (Figura 5).

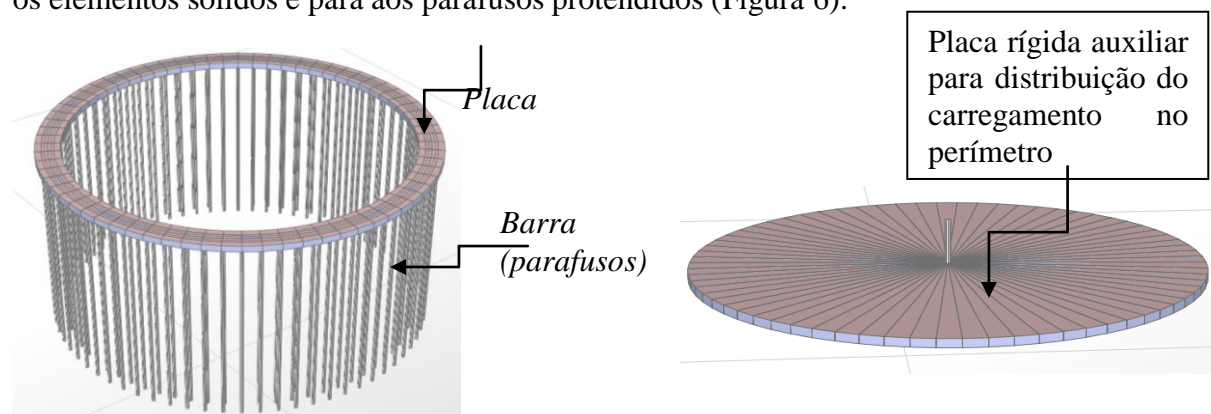


**Figura 4 – Seção transversal - Modelo 3D analisado no software SAP 2000**



**Figura 5 – Aplicação do carregamento - Modelo 3D analisado no software SAP 2000**

A placa rígida (*Shell* rígido) foi unida aos parafusos protendidos e com a Base do Aerogerador (elemento *SOLID*) por meio de elementos de contato que somente são solicitados quando solicitados à compressão, ou seja, toda tração provocada pelos carregamentos da torre é transmitida diretamente ao parafuso protendido e a compressão para os elementos sólidos e para aos parafusos protendidos (Figura 6).



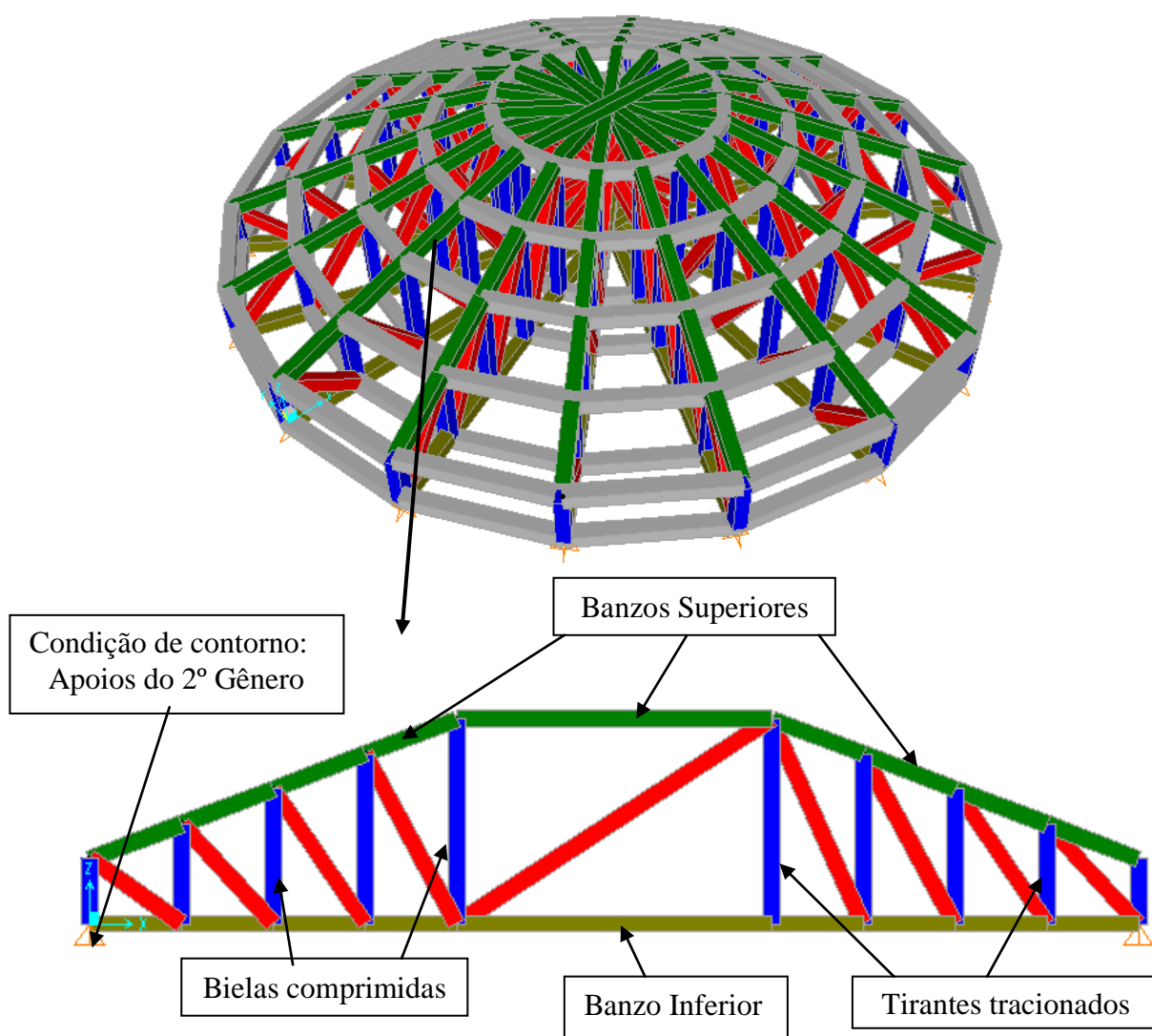
**Figura 6 – Modelo SAP2000 – Placas e barras**

#### *Modelo 02 – idealizado em elementos FRAMES*

O Modelo 02 foi idealizado com elementos do tipo *FRAME* para representar as Bielas e os Tirantes. Esse modelo é composto de bielas comprimidas, tirantes tracionados, banzos inferiores e superiores.

Foi idealizada uma treliça espacial, no entanto analisada uma treliça plana, adotando a seção transversal crítica de dimensionamento. Foi lançada uma treliça para cada estaca, totalizando 18 treliças, interligadas entre si.

Como condição de contorno utilizaram-se apoios do 2º Gênero no encontro com as estacas. Todas as barras foram adotadas com propriedades físicas e geométricas iguais. Adotou-se seção transversal quadrada 20x20cm. O peso próprio desses elementos foi desprezado da análise. As barras foram rotuladas entre si para somente existir esforços axiais

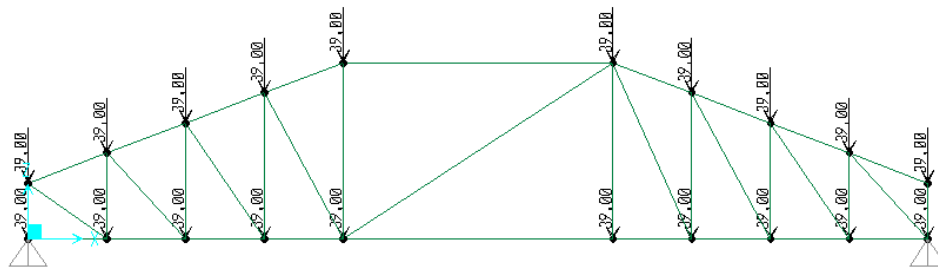


**Figura 07 – Modelo 02 – Treliça – Biela/Tirante**

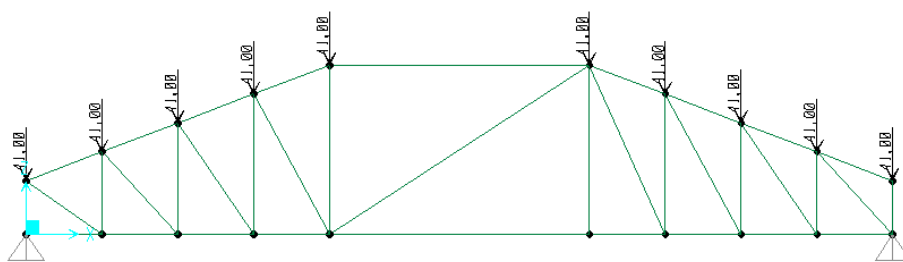
Diante da premissa de manter bielas comprimidas e tirantes tracionados, as bielas da região da esquerda possuem inclinação diferente da região da direita, tendo em vista que a região da esquerda está tracionada e a região da direita está comprimida.

Por fim, o ângulo de inclinação das bielas em relação ao eixo longitudinal do elemento está compreendido entre 30° e 63°, conforme prescrito na NBR 6118:2014.

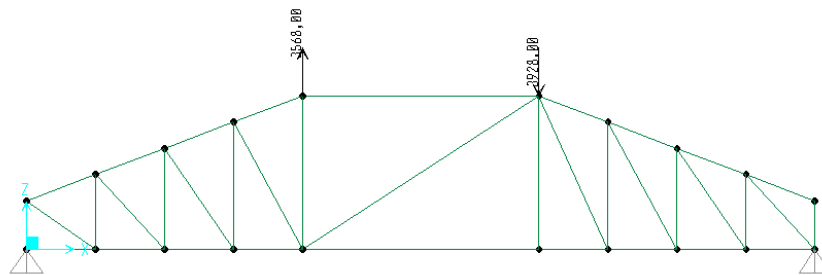
O carregamento foi aplicado nos nós da treliça, conforme Figuras 08, 09 e 10.



**Figura 08 – Aplicação de carregamento: peso próprio**



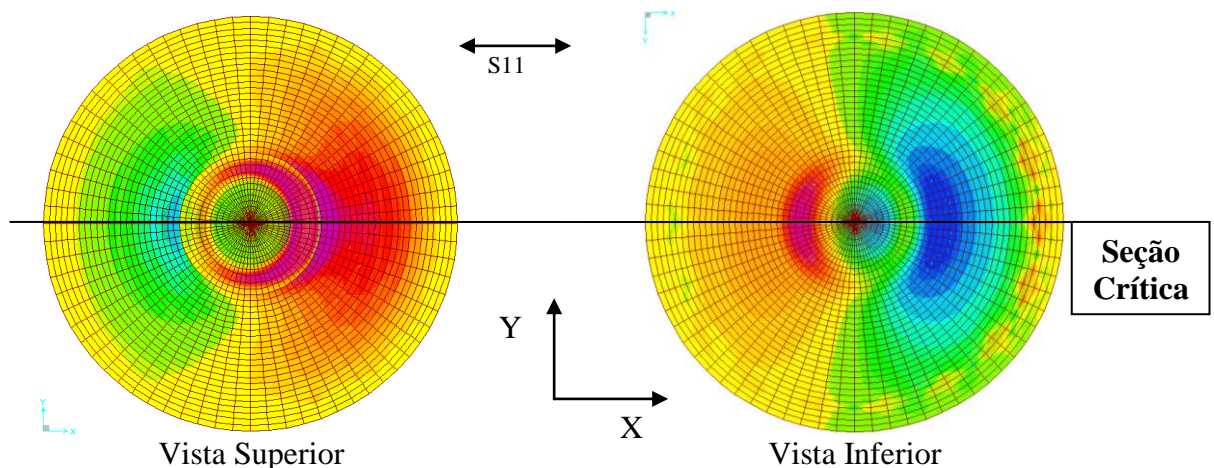
**Figura 09 – Modelo 02 – Aplicação de carregamento: reaterro**



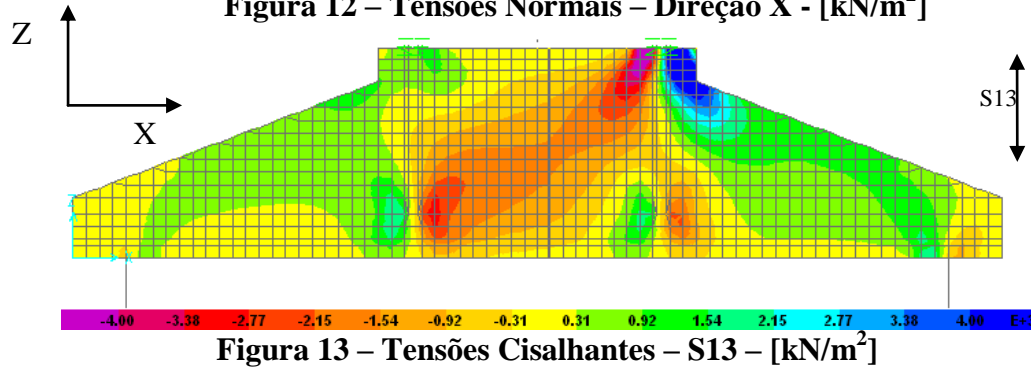
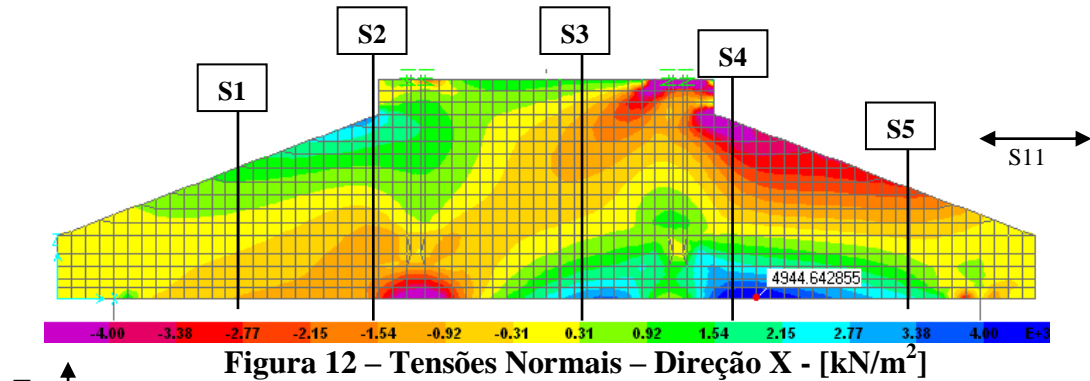
**Figura 10 – Modelo 02 – Aplicação de carregamento: carga extrema aerogerador**

**Resultados**

*Modelo 01 – idealizado em elementos Solids*



**Figura 11 – Tensões normais S11 - vista inferior e vista superior**



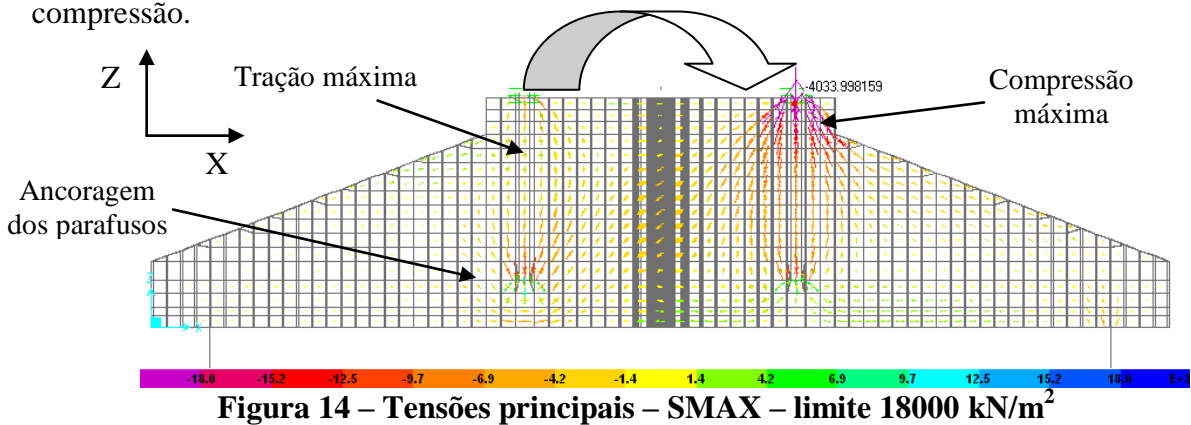
O procedimento de cálculo adotado se inicia com a integração das tensões normais nas seções críticas em estudo para obtenção dos esforços internos e, em seguida, calcula-se a área de aço necessária para a flexão composta reta seguindo a teoria clássica de concreto armado no Estádio III.

**Tabela 4 – Esforços internos e armaduras calculadas – Modelo 01**

	S1	S2	S3	S4	S5
M (kNm)	730,78	3188,34	-3845,59	-6086,02	-1652,51
N (kN)	39,31	156,08	-805,61	-1924,48	-580,19
V (kN)	679,62	2079,26	-3154,31	2889,02	1320,95
A <sub>sl</sub> (cm <sup>2</sup> )	10,25	30,73	29,16	55,92	22,34
A <sub>sw</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	5,80	11,94	-	16,29	11,27

Obs.: momentos negativos tracionam a face inferior. Esforços axiais negativos: compressão.

Apresentam-se a seguir as tensões principais e também a verificação nas tensões de compressão.







Modelo 02 – idealizado em elementos FRAMES

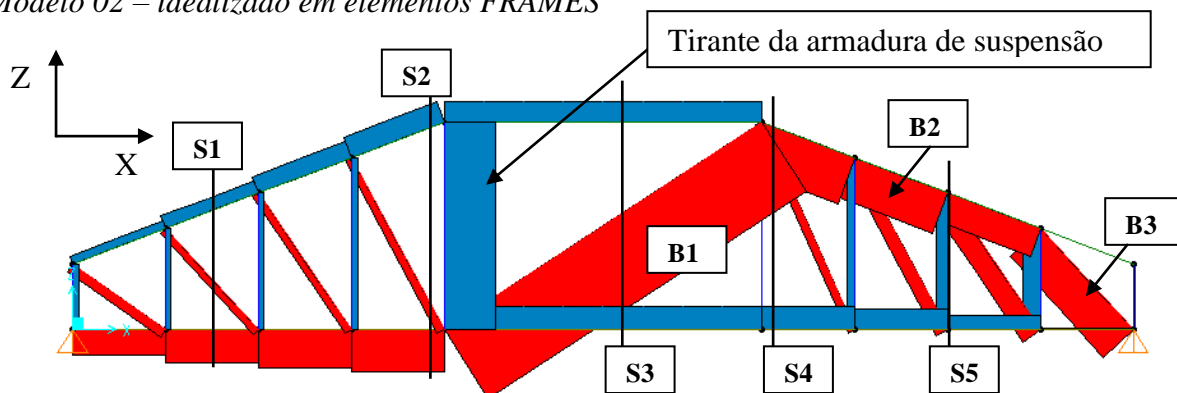


Figura 15 – Esforços axiais – [kN]

Apresentam-se a seguir os esforços de cálculo nos tirantes tracionados bem como as armaduras calculadas para cada seção. As barras verticais da treliça representam os esforços cisalhantes e os banzos inferior e superior representam os esforços na direção horizontal.

Tabela 5 – Esforços internos e armaduras calculadas – Modelo 02

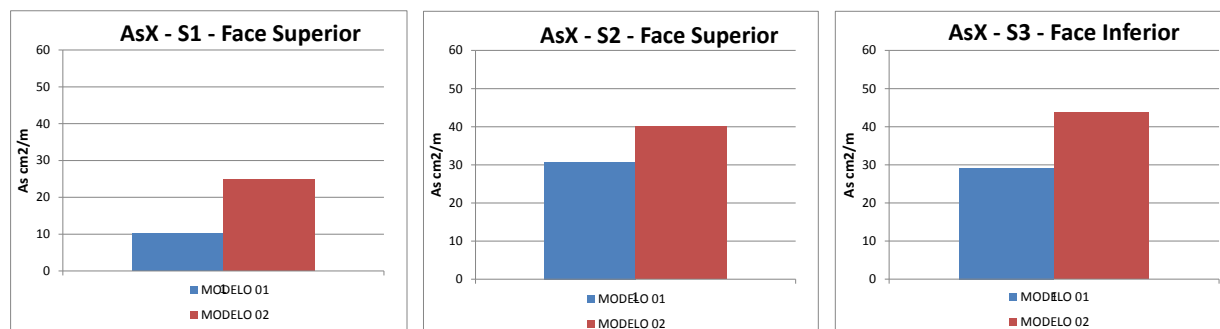
	S1	S2	S3	S4	S5
N (kN)	1078	1740	1906	1906	1164
V (kN)	480	535	-	609	963
$A_{sl}$ (cm <sup>2</sup> )	24,8	40,0	43,8	43,8	26,8
$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> /m)	8,76	9,84	-	11,2	17,71

Obs.: esforços axiais positivos indicam tração.

De acordo com a NBR 6118:2014, a tensão limite de compressão as bielas atravessadas por mais de um tirante é:  $\sigma_{lim} = 0,6 \times \alpha_{v2} \times f_{cd} = 0,6 \times 0,88 \times 21,42 = 11,3$  MPa. Foram determinadas três bielas críticas para verificação da compressão (B1, B2 e B3 Figura 15).

[B1:  $N_d = - 6743$  kN ; Área = 1,4 m<sup>2</sup> ;  $\sigma_{B1} = 4,81$  MPa (ok)] [B2:  $N_d = - 4043$  kN ; Área = 1,2 m<sup>2</sup> ;  $\sigma_{B2} = 3,37$  MPa (ok)] [B3:  $N_d = - 3388$  kN ; Área = 1,42 m<sup>2</sup> ;  $\sigma_{B3} = 2,38$  MPa (ok)]

### Comparativo dos resultados



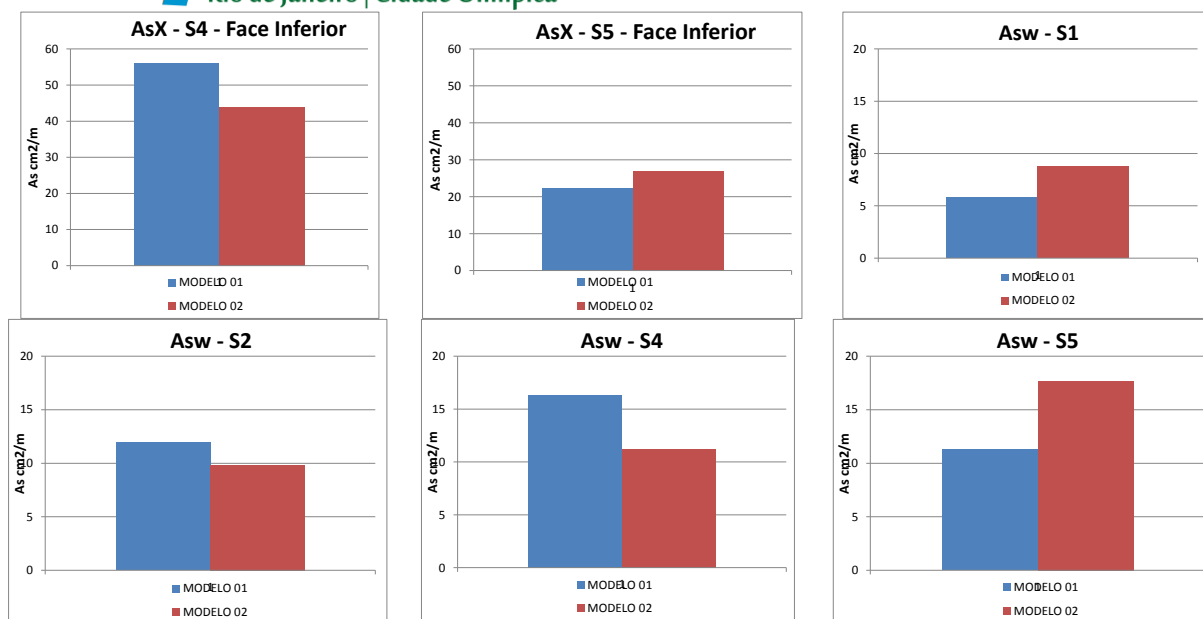


Figura 16 – Comparativo armaduras

## Conclusões

A análise dos resultados mostrou que a idealização de um Modelo Biela-Tirante em uma treliça plana apresenta resultados satisfatórios quando comparada com o Modelo Tridimensional, modelo este completo e sofisticado. O comparativo das armaduras radiais mostrou que o modelo biela-tirante apresentou valores maiores do que o modelo tridimensional, com exceção da Seção 4, que representa a armadura radial inferior da Base. O comparativo das armaduras de cisalhamento mostrou que as seções das extremidades S1 e S5 resultaram em armaduras superiores quando calculadas pelo Modelo Biela-Tirante, em média 35 %. Já para as Seções S2 e S4, o modelo tridimensional em elementos *SOLIDS* apresentou armaduras em média 30% superiores. A verificação do esmagamento das bielas foi realizada, estando os valores de acordo com os limites impostos pela NBR 6118:2014. Vale destacar que na Biela 01, a tensão de compressão ficou próxima da máxima tensão de compressão obtido no Modelo Tridimensional. Cabe destacar que o Modelo Biela-Tirante não permitiu avaliar o efeito de grupo das estacas, a protensão dos parafusos nem a armadura tangencial, disposta perpendicularmente à armadura radial. Por fim, mesmo possuindo suas limitações, recomenda-se a utilização de Modelos Biela-Tirantes para a análise das tensões de uma Base para Aerogerador. O modelo Biela-Tirante é ideal para realizar uma análise prévia da geometria da base antes de efetivamente conceber um modelo sofisticado (tridimensional em elementos *SOLIDS*), que exige mais esforço de elaboração e análise dos resultados.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projetos de estruturas de concreto armado. NBR 6118. Rio de Janeiro: 2014.
- BATHE, K. J.; E. L. WILSON, "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice-Hall, 1976.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, Analysis Reference Manual For SAP2000, Berkeley, 2016.
- GUIDELINES\_for\_Design\_of\_Wind\_Turbines, DNV/Riso – 2002.
- SILVA, R. C. e GIONGO, S. Modelos de Bielas e Tirantes Aplicados a Estruturas de Concreto Armado. Editora EECS, São Carlos, SP: 2000.