



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Análise numérica de fundações diretas de aerogeradores

Carlos A. Menegazzo Araujo, Dr.¹, André Puel, Msc², Anderson Candemil³

¹ MENEGAZZO Projeto e Consultoria Ltda / carlos.menegazzo@gmail.com

² IFSC Instituto Federal de Santa Catarina / puel@ifsc.edu.br

³ GEONERGY Engenharia e Serviços Ltda / anderson.candemil@geoenergy.com.br

Resumo

A participação da energia eólica no sistema elétrico nacional ainda apresentará forte crescimento nos próximos anos. É essencial que o Brasil possua boa tecnologia de projeto para essa demanda. As fundações dos aerogeradores são um tipo especial de estrutura devido aos seus casos de carregamento, geometrias e limites de projeto. Frequentemente essas fundações são analisadas como cascas ou placas pelo método dos elementos finitos, embora para muitos casos não traga a melhor solução de projeto. Este artigo apresenta um estudo comparativo entre modelos de elementos finitos utilizando elementos de casca e de elementos sólidos, aplicados a casos de projeto de fundações diretas de aerogeradores. A análise de tensões dos modelos indica a importância dos modelos sólidos no projeto estrutural, mostrando fluxos de tensões diferentes para cada modelo. A interface solo-estrutura é modelada com elementos de contato não-lineares.

Palavras-chave

Aerogerador, energia eólica, fundação, elementos finitos, análise de tensões.

Introdução

O projeto completo da fundação de um aerogerador envolve diversas etapas, entre elas: análise do solo, concepção estrutural, definição das condições de contorno, verificação de estabilidade, análise de tensões, dimensionamento de armaduras, verificações de serviço, verificação de fadiga, etc.

Nesse artigo é apresentado um estudo de fundações diretas de aerogeradores modeladas pelo método dos elementos finitos, abordando as etapas de concepção estrutural e análise de tensões. As verificações apresentadas são apenas didáticas e não há intenção dos autores em esgotar o assunto de um projeto tão complexo.

O objetivo do trabalho é analisar o comportamento desse tipo de fundação, identificando a concepção estrutural mais adequada para projeto.

Adotando as mesmas condições de contorno, foram modeladas duas geometrias de fundação diferente e, para cada uma, foram desenvolvidas dois modelos de elementos finitos, um modelo com elementos de casca e um modelo com elementos sólidos.



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

Geometria

Para o caso de estudo, foi adotada geometria de fundação circular com altura variável, conforme a figura 1. Os parâmetros adotados para cada modelo são apresentados na tabela 1, sendo h a menor altura, H a maior altura e D o diâmetro da fundação.

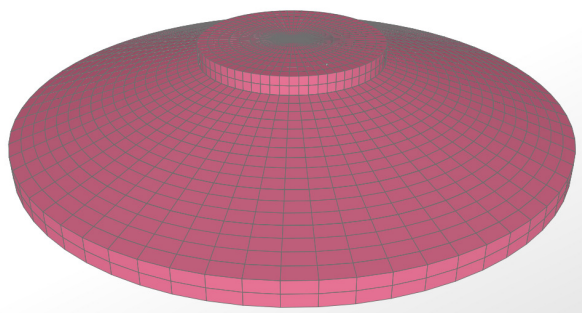


Figura 1 – Geometria circular com altura.

Tabela 1 – Resumo da geometria dos modelos.

Modelo	Elemento	h (m)	H (m)	D (m)
1 A	Casca	0,60	1,85	15,00
1 B	Casca	1,50	2,75	15,00
2 A	Sólido	0,60	1,85	15,00
2 B	Sólido	1,50	2,75	15,00

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
$f_{ck} = 30$ MPa	$f_{yk} = 500$ MPa; E_s	$f_{yk} = 420$ MPa; E_s	$\gamma_{sat} = 20$ kN/m ³ ;
$E_{cs} = 26.071$ MPa	$= 200.000$ MPa;	$= 200.000$ MPa;	$k_v = 13.500$ kN/m ³ .
$\gamma = 24$ kN/m ³	$\gamma = 78,5$ kN/m ³ .	$\gamma = 78,5$ kN/m ³ .	



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Carregamentos

Cargas devido ao aerogerador

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

Tabela 3 – Carregamentos devido ao aerogerador.

γ_f (-)	F horizontal (kN)	F vertical (kN)	M tombamento (kN.m)	M torsor (kN.m)
1,4	500	2600	45000	1000

Reaterro

Foi considerado o aterro atuante na face superior conforme indicado no arranjo geral.

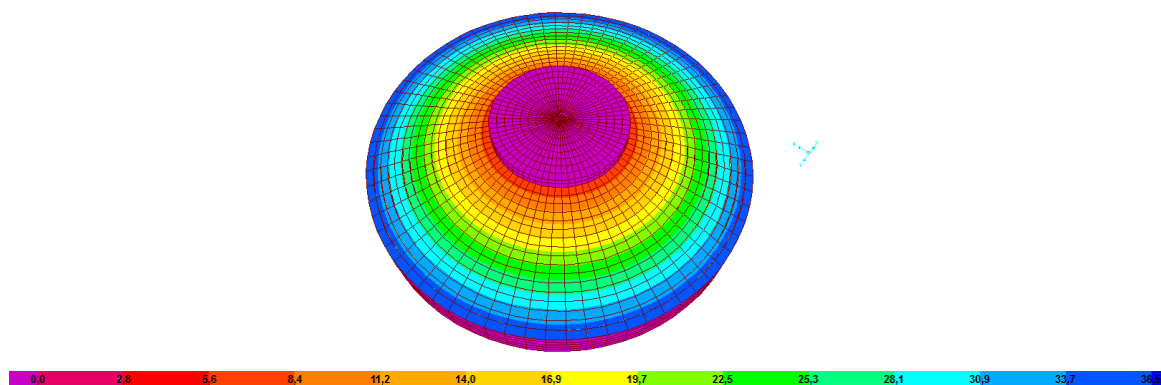


Figura 2 – Carregamento devido ao reaterro.

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 350 kN em cada parafuso.

Casos de Carregamento

Para simplificação do estudo será analisada somente um caso crítico de carregamento, nomeado como “*ELU_My*”.

ELU_My: 1,4 Peso Próprio + 1,4 Reaterro + 1,4 Aerogerador + 1,0 Protensão



Concepção estrutural – Modelos com elementos de casca

A estrutura foi analisada no programa SAP2000, pelo método numérico dos elementos finitos. Foram utilizados elementos isoparamétricos de quadro nós tipo casca (BATHE; WILSON, 1976 e ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 1989) e elementos de barra rígida (elementos tipo Frame). As espessuras dos elementos de casca variam uniformemente de forma crescente da extremidade para o centro da placa.

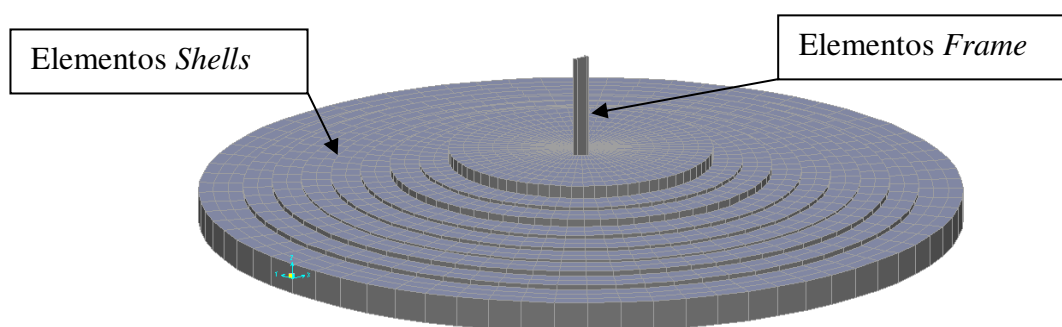


Figura 3 – Modelo com elementos de casca.

Como condição de contorno, foram adicionadas molas não-lineares em toda a superfície de contato com o solo, sendo que esses elementos de contato somente são solicitados quando estão submetidos à compressão. A rigidez de mola adotada é igual a 13.500 kN/m^3 (ALONSO, 1982).

A aplicação do carregamento foi realizada na extremidade do elemento de barra, no centro da placa (Figura 4). Para manter um comportamento de corpo rígido, foram adotados *Constrains* nos nós centrais da placa e da barra. Com esse procedimento foi possível reduzir as concentrações de tensões na ligação entre a barra e a casca.

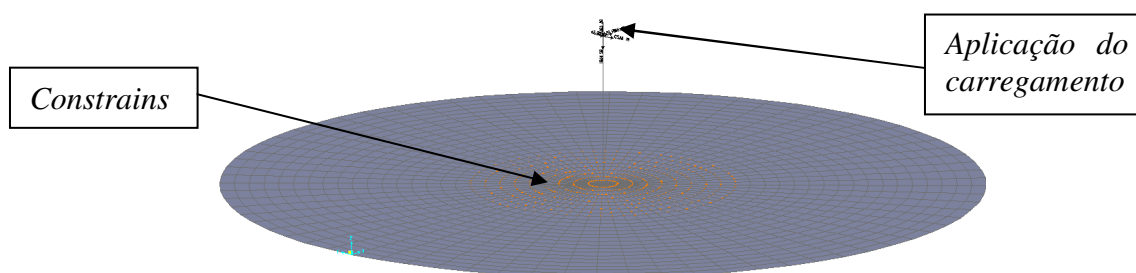


Figura 4 – Modelo numérico SAP2000 – Condição de Contorno



Concepção estrutural – Modelos com elementos sólidos

A estrutura também 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.

Assim como nos modelos de placa, foram adicionadas molas não-lineares em toda a superfície de contato com o solo, mantendo-se as mesmas condições de contorno dos demais modelos (Figura 5).

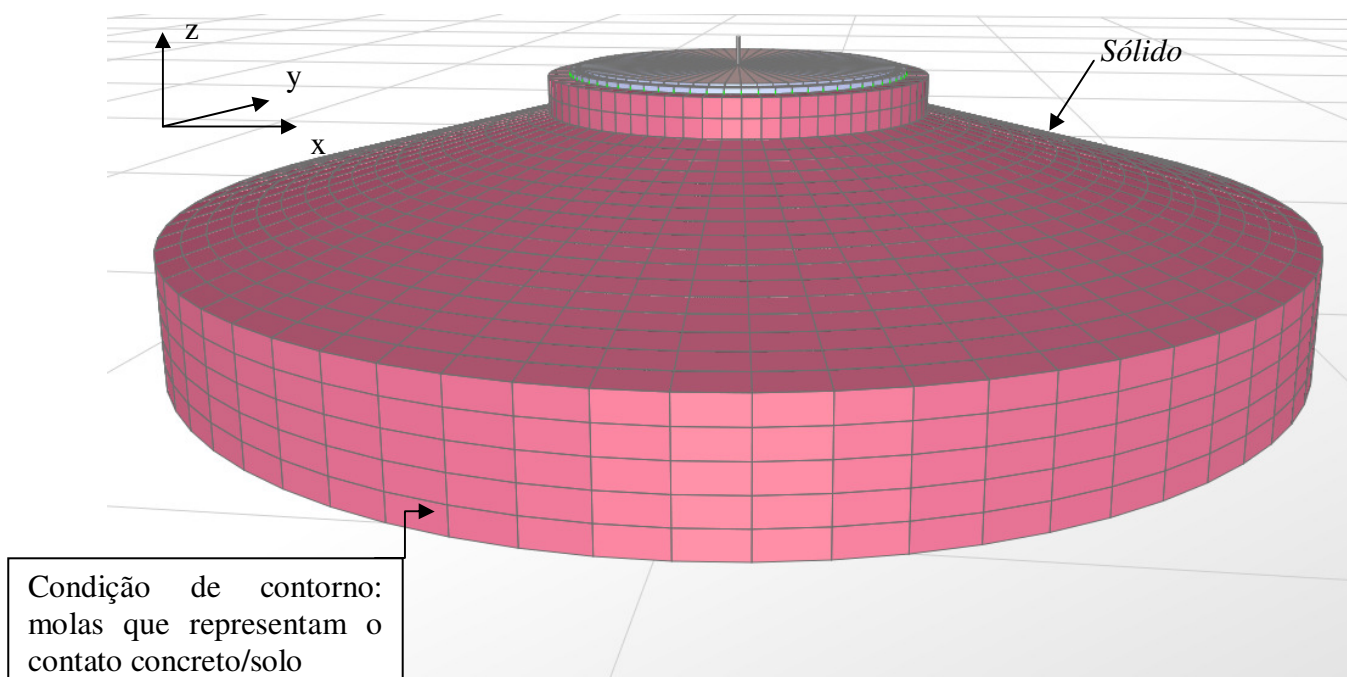


Figura 5 – Modelo numérico SAP2000 – Tridimensional

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 (Figuras 6).

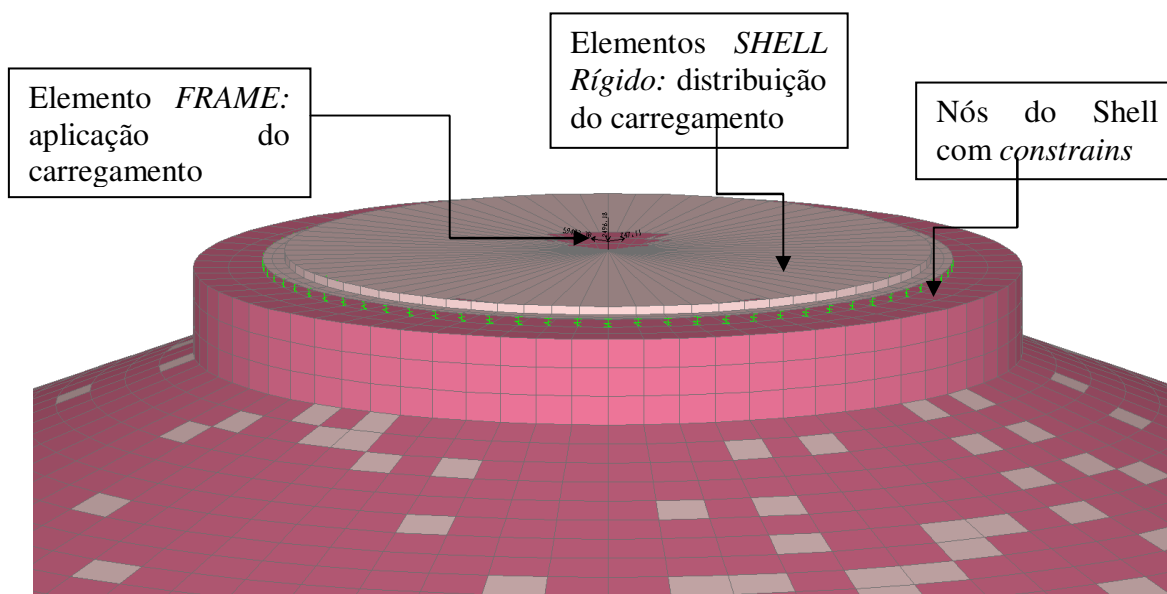


Figura 6 – Seção transversal - Modelo 3D analisado no software SAP 2000

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 7).

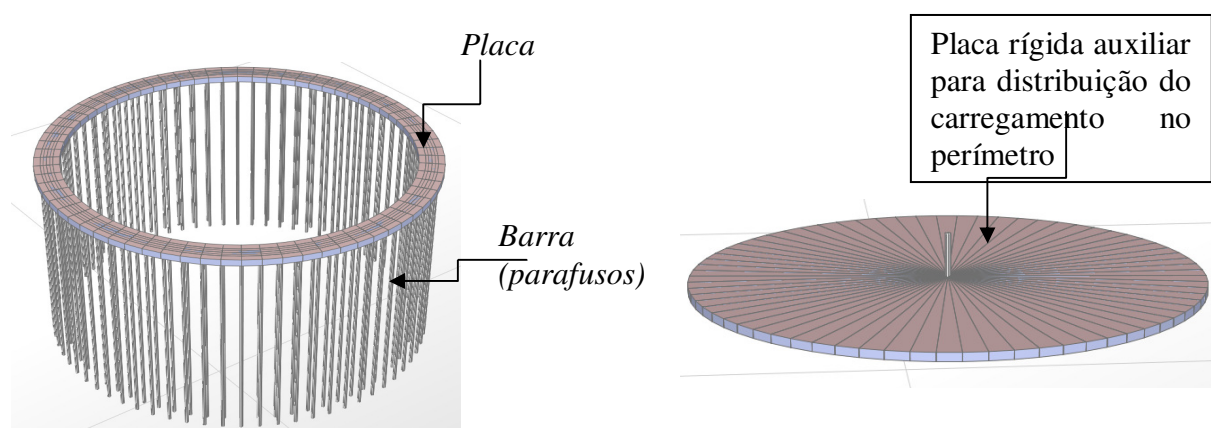


Figura 7 – Modelo SAP2000 – Placas e barras

Resultados das tensões normais

As Figuras 8 a 14 apresentam e comparam os resultados obtidos para os modelos propostos.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

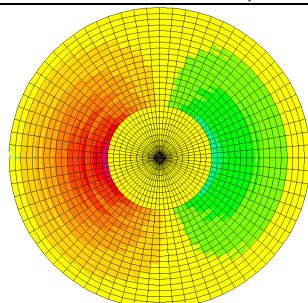
21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

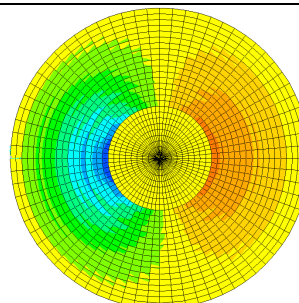
Realização:



Modelo 1A – Casca – H = 1,85 m

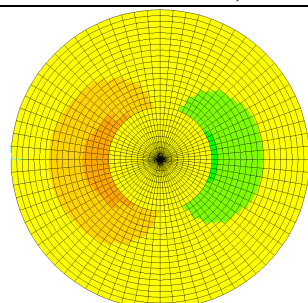


Vista superior

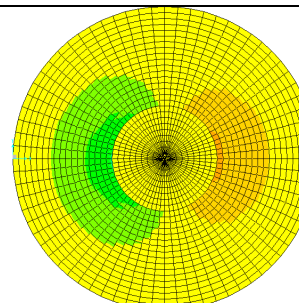


Vista inferior

Modelo 1B – Casca – H = 2,75 m

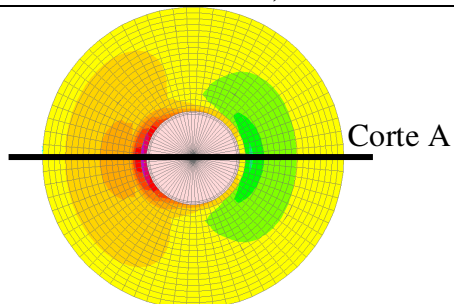


Vista superior

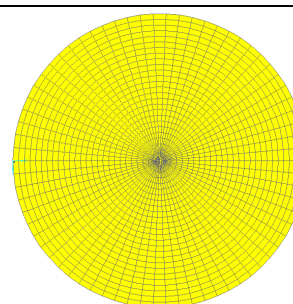


Vista inferior

Modelo 2A – Sólido – H = 1,85 m

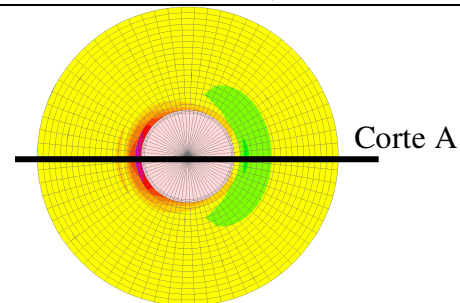


Vista superior

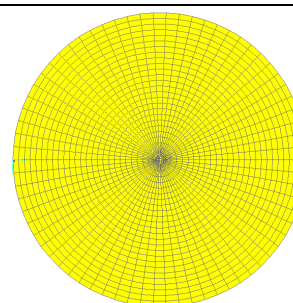


Vista inferior

Modelo 2B – Sólido – H = 2,75 m



Vista superior



Vista inferior



Figura 8 – Tensões radiais (MPa)



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

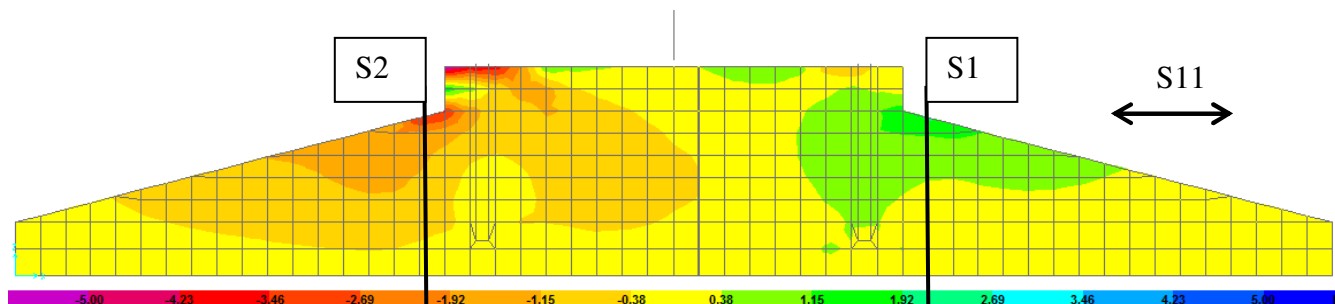


Figura 9 – Tensões Radiais S11 – Corte A - Base H = 1,85 m - (MPa)

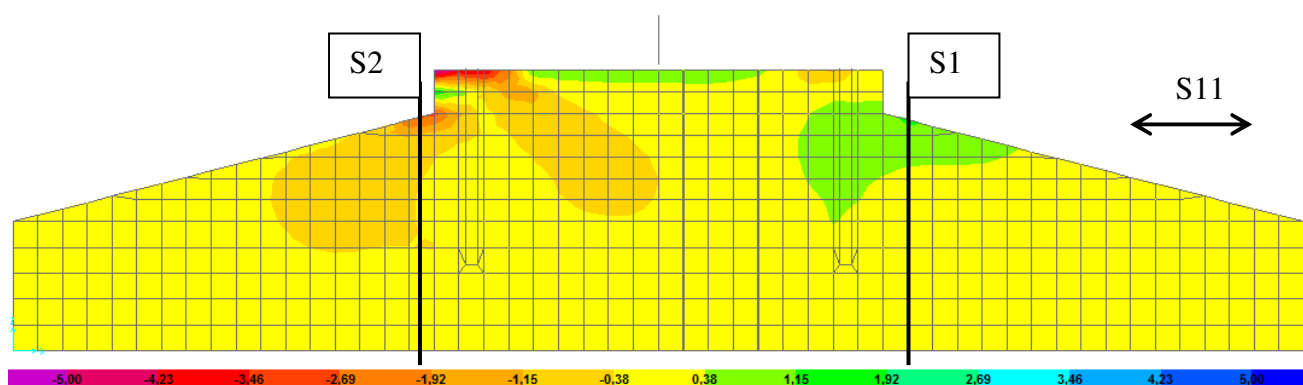


Figura 10 – Tensões Radiais S11 – Corte A - Base H = 2,75 m - (MPa)

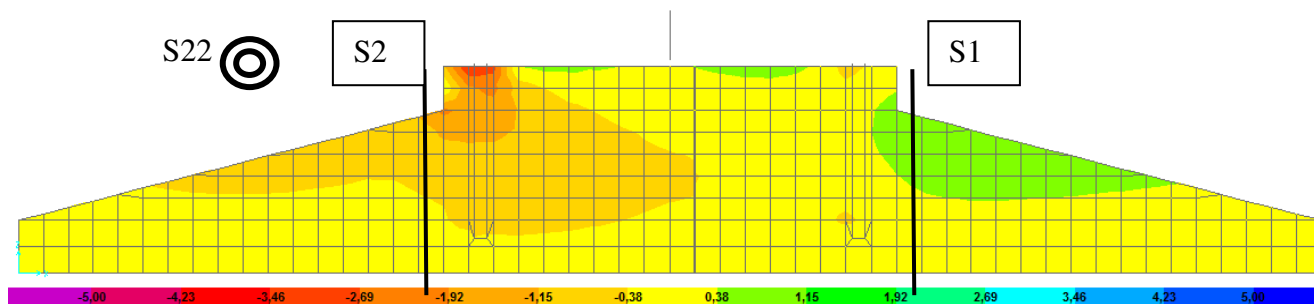


Figura 11 – Tensões longitudinais S22 – Corte A - Base H = 1,85 m - (MPa)

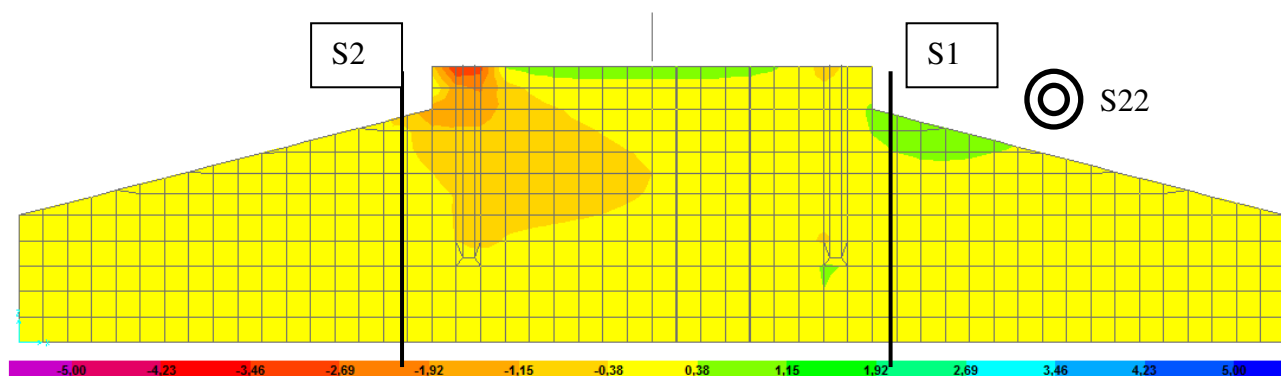


Figura 12 – Tensões longitudinais S22 – Corte A - Base H = 2,75 m - (MPa)



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

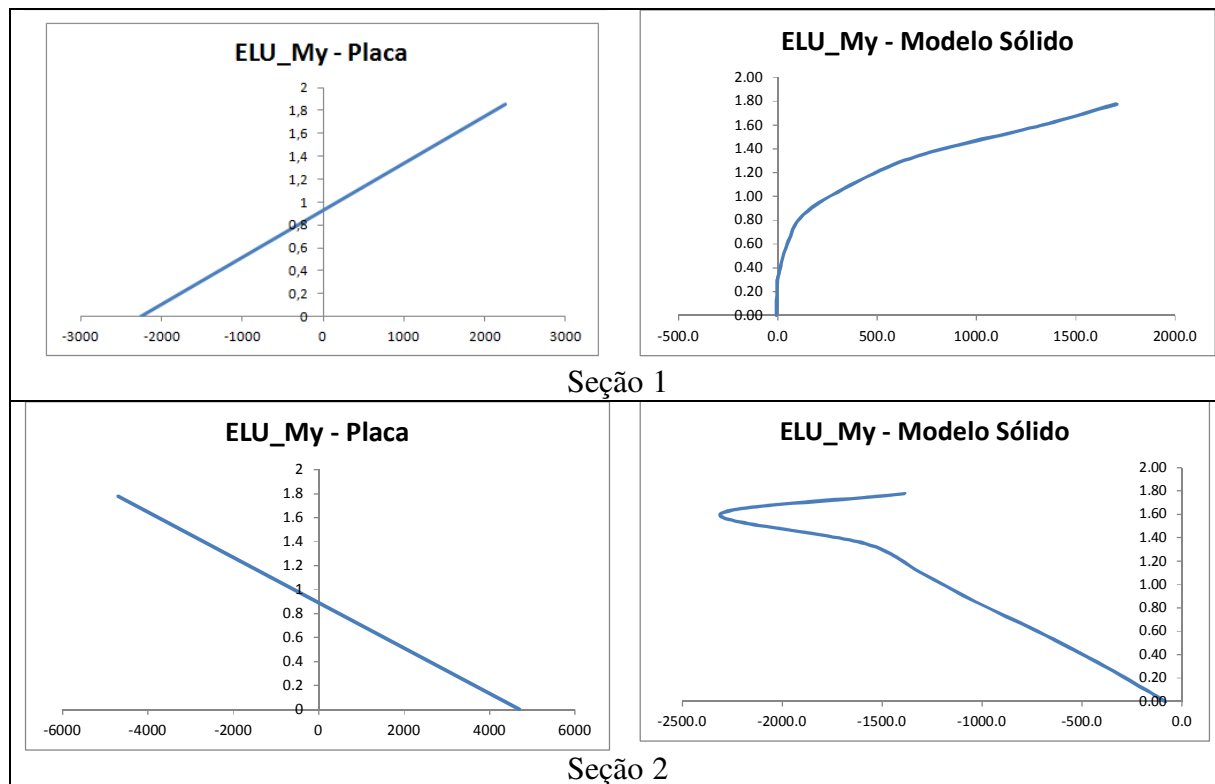


Figura 1 – Tensões Radiais S_{11} – Base $H = 1,85$ m - (kN/m^2)

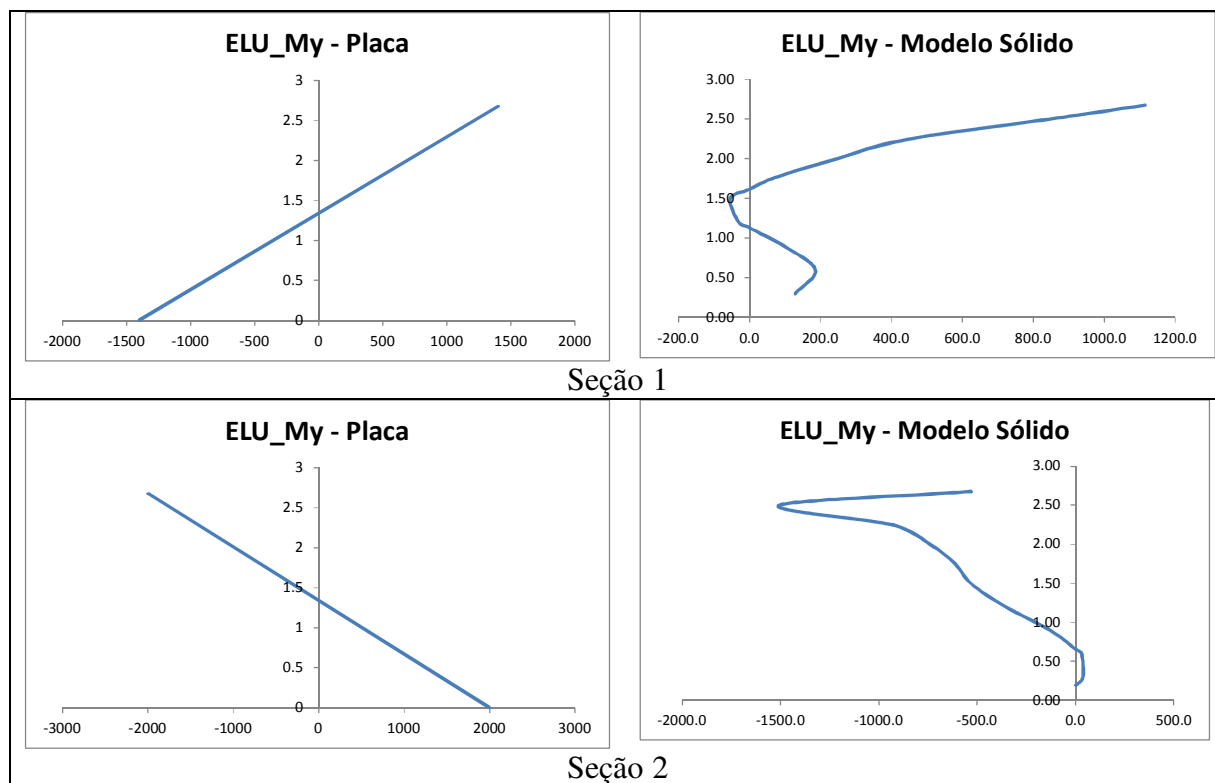


Figura 14 – Tensões Radiais S_{11} – Base $H = 2,75$ m - (kN/m^2)

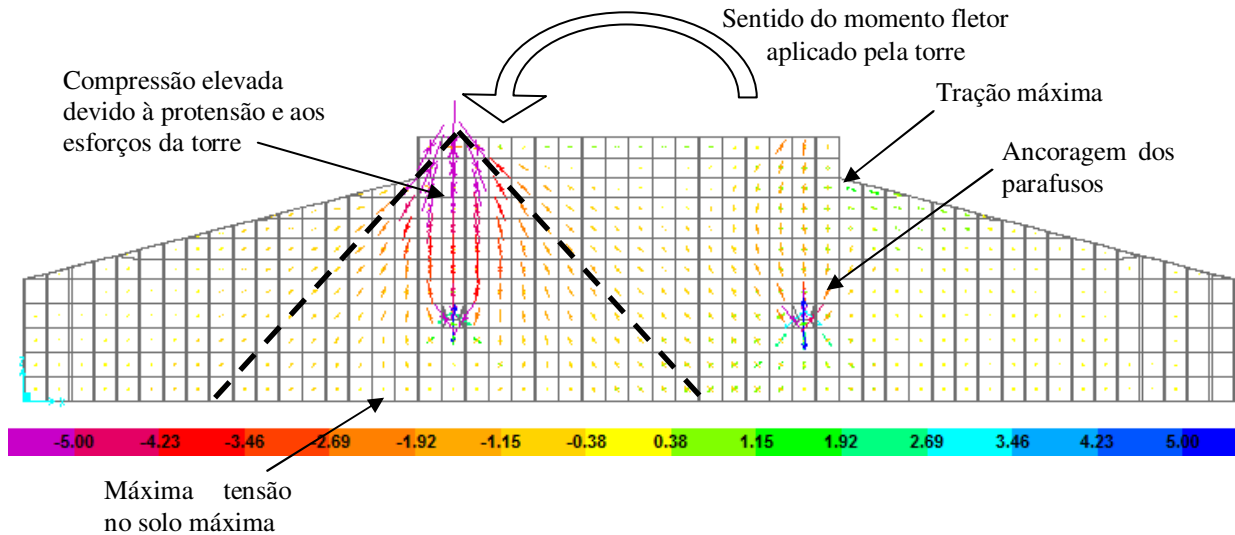


Figura 16 – Fluxo de Tensões Principais - Base H = 2,75 m - (MPa)

Conclusões

A análise de tensões dos modelos indica que, para os casos estudados, as fundações apresentam comportamento rígido, distribuindo as tensões de compressão com ângulo de propagação próximo de 45°. Assim sendo, os modelos que utilizam sólidos foram mais adequadas ao comportamento estrutural. Apesar de serem mais sofisticados, os modelos sólidos podem trazer um projeto de fundação mais econômico e racional, além de fornecer informações adicionais como os esforços nos parafusos, distribuição de tensões ao longo da altura, comportamento estrutural, etc.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos à empresa GeoEnergy Engenharia e Serviços Ltda pelo fornecimento dos programas computacionais necessários ao desenvolvimento desse trabalho.

Referências

- ALONSO, U. R. Exercícios de fundação. Edgard Blucher, 1982.
- BATHE, K. J.; E. L. WILSON, "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice-Hall, 1976.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, Analysis Reference Manual For SAP2000, Berkeley, 2009.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; R. L. TAYLOR, The Finite Element Method, 4th Edition, Vol. 1, McGraw-Hill, London, 1989.