

THE EFFECTS OF MODELLING TOWER-FOUNDATION CONNECTION STIFFNESS IN A FINITE ELEMENT WIND TURBINE CONCRETE FOUNDATION MODEL

Robson Ribeiro

José Neres da Silva Filho

Robsonribeiro620@gmail.com

jneres@ect.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil.

Avenida Senador Salgado Filho 3000 - Campus Universitário, Lagoa Nova, 59078-970, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

Abstract. Nowadays, one of the main challenges regarding the design of concrete wind turbine foundations is the search of reliable structural numerical models, which allows concrete and steel volume reduction, providing more cost benefit solutions. Due to the necessity of modelling the physical situation in a trustworthy manner, it's imperative to consider not only the soil-structure interaction, but also the stiffness of support structure (wind turbine tower). Therefore, the present paper aims to analyse the effects of tower-foundation connection stiffness in the internal stresses of foundation element (pile group foundation with a pile cap), as well the global rotational stiffness provided to the system, that being an essential parameter to guarantee dynamic stability to the wind turbine. The foundations were model using the SAP 2000, a finite element software. Shell (thin and thick) and solid elements were use in the foundation model, whilst thin shell elements were designate to represent the tower behaviour. The results show that the anchor bolt cage provide a high stiffness to the foundation core modifying the stress distribution along all the pile cap.

Keywords: wind turbine foundation, finite element, soil-structure interaction.

1 Introdução

Atualmente, a crescente preocupação com a escassez dos recursos energéticos vem levado vários países a investirem de forma massiva na produção de energia por meio de fontes renováveis. Nesse contexto, a energia eólica figura como uma alternativa cada vez mais viável para o abastecimento das demandas energéticas da humanidade, o que pode ser evidenciado a partir das estatísticas de capacidade instalada da Agência Internacional de Energias Renováveis [1] (*International Renewable Energy Agency - IRENA*,) que revelam que de 2010 a 2017 a capacidade instalada mundial de energias renováveis passou de 1.225.714 MW para 2.176.099 MW, tendo-se um crescimento proeminente em países como a China, Estados Unidos e Alemanha. Segundo o mesmo documento, do total da capacidade instalada de geração de energia renovável, tem-se uma capacidade de 513.939 MW referente à energia eólica no ano de 2017, o que equivale a pouco menos de 24% do total, mostrando a importância dessa matriz energética em uma escala global.

No que tange a engenharia civil, a geração de energia a partir do vento apresenta desafios relativos ao projeto das estruturas de suporte dos aerogeradores, bem como da construção dos parques e toda a infraestrutura necessária. Com relação as fundações, que chegam a representar cerca de 16% do custo total de instalação do parque (BLANCO *apud* IRENA [1]), tem-se a necessidade de chegar a estruturas que forneçam a rigidez necessária para evitar problemas de vibração nas torres, sem que haja um aumento muito grande do seu custo. Nesse ponto, uma das problemáticas que se apresenta é relativa ao comportamento estrutural dessas fundações, uma vez que, devido ao seu tamanho, magnitude e natureza de suas cargas, não podem ser tratadas como fundações convencionais. Os modelos numéricos a serem utilizados devem ser avaliados com calma, para que o comportamento representado tenha sentido físico frente à estrutura real.

Visando o entendimento da funcionalidade dos modelos numéricos frente ao referido problema, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da consideração da rigidez da conexão torre-fundação no comportamento estrutural representado por modelos com elementos finitos planos e sólidos tanto nos esforços internos (momentos fletores e esforço cortante) quanto na rigidez rotacional da fundação, sendo esse um parâmetro de extrema importância para o controle vibracional do aerogerador.

2 Modelos de análise

2.1 Considerações iniciais

O presente trabalho fez uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) para a análise da estrutura a partir do *software* SAP 2000. Ao todo foram considerados cinco modelos distintos, sendo que três deles utilizaram elementos planos do tipo CASCA e os outros dois foram modelados com elementos SÓLIDOS. Além do tipo de elemento finito adotado, os modelos se diferenciam também pela maneira como as cargas provenientes da torre são aplicadas à fundação, bem como a representação da rigidez da ligação entre esses elementos.

Primeiramente, faz-se necessário entender as particularidades envolvidas na maneira como é feita a ligação entre a torre e a fundação em estruturas de aerogeradores. No caso de uma fundação convencional de um pilar, por exemplo, a transferência de cargas se dá pelo contato direto em uma estrutura monolítica com a formação de bielas comprimidas. Além disso, não é comum na fundação de edifícios de concreto que haja tração nas fundações devido ao momento de tombamento (pois o peso próprio da estrutura por si só garante que as estacas ou sapatas estejam todas submetidas a cargas de compressão ou flexo-compressão).

Já em uma fundação de aerogerador, tem-se um sistema de ligação feito por meio barras metálicas ligadas a flange inferior da torre de suporte e a um anel metálico imerso na fundação, formando, assim, uma espécie de “gaiola” de ancoragem. Geralmente, essas barras são sujeitas a uma protensão inicial para evitar haja o descolamento do flange inferior da torre da fundação na ocorrência de cargas laterais extremas. A Fig. 1 mostra o sistema convencional de transferência de carga pilar-sapata, ao passo que a Fig. 2 mostra o sistema de ancoragem em fundações de torres eólicas.

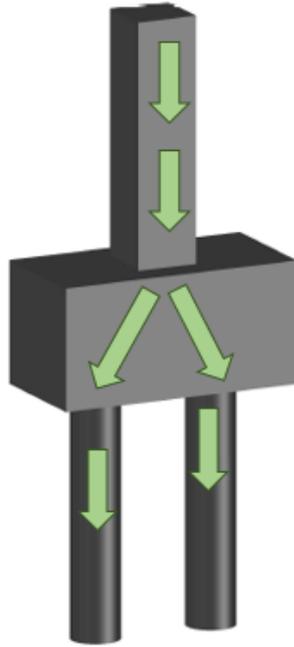


Figura 1. Transferência de carga por compressão.

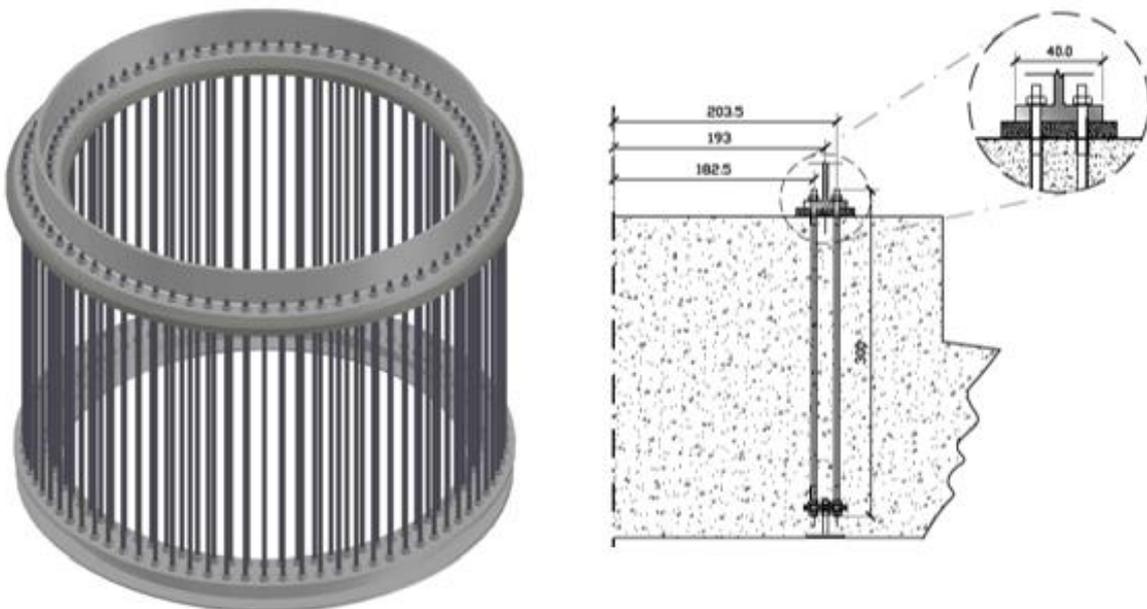


Figura 2. Anel de ancoragem.

A partir desse sistema de ancoragem tem-se que a cargas são introduzidas no modelo no perímetro de contato entre a torre e a fundação, mas, não só isso, as cargas de compressão e tração são aplicadas de maneiras distintas. Enquanto a primeira é transferida, principalmente, por meio do contato direto entre o flange inferior da torre e a fundação (onde geralmente é adotado um *graute* de alta resistência para evitar o esmagamento do concreto), a segunda é transferida apenas pelas barras protendidas e pelo efeito de cunha que o anel metálico inferior proporciona. Além disso, uma questão ainda mais

importante é o fato de que a gaiola de ancoragem entra como um elemento de rigidez elevada na fundação, o que pode modificar a distribuição de tensões na mesma. Enfim, tendo em vista essa problemática, foram propostos cinco modelos onde a interação entre a “gaiola” de ancoragem e a fundação é modelada de diferentes maneiras, a fim de verificar o efeito dessa consideração. Os itens que se seguem descrever de forma mais detalhada esses modelos.

2.2 Apresentação do estudo de caso

O presente estudo tem como objeto um estudo de caso presente em Freitas [2] referente às fundações executadas no Parque Eólico de Miassaba 3, localizado no município de Macau, Rio Grande do Norte. Nesta obra foram instalados aerogeradores da marca ALSTOM com especificação ECO 86, tendo uma altura de cubo de 80 m, torre de aço e rotor com diâmetro de 86 m.

A fundação adotada consiste em um conjunto de 24 estacas do tipo raiz com 35 cm de diâmetro e 7 m de comprimento, cujo trabalho conjunto é garantido por meio de um bloco de coroamento de concreto armado com 14,50 m de diâmetro de 2,95 m de altura na região central. A Fig. 3 e a Tabela 1 apresentam as principais características geométricas da fundação.

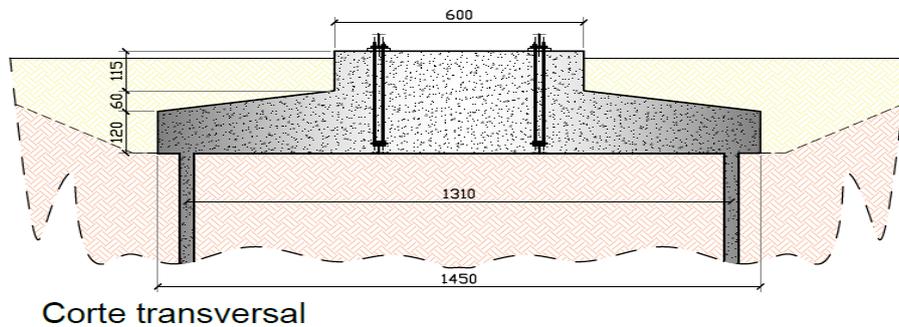


Figura 3. Corte transversal da fundação.

Tabela 1. Dados da geometria da fundação.

Dados da fundação	
Diâmetro externo	14,50 m
Diâmetro do pedestal	6,00 m
Altura da borda extrema	1,20 m
Altura no encontro do pedestal	1,80 m
Altura do pedestal	2,95 m
Diâmetro do estaqueamento	13,10 m
f_{ck} do bloco de coroamento	30 MPa
E_{cs} do bloco de coroamento	26 GPa
f_{ck} das estacas	20 MPa
E_{cs} das estacas	21 GPa
Diâmetro das estacas	35 cm
Comprimento das estacas	7,00 m

Para a caracterização geotécnica do local, dispõe-se do resultado do ensaio de SPT de 6 furos de sondagem, além do resultado de prova de carga estática de 4 estacas. No geral, o perfil do solo é composto por uma camada de 3m de areia siltosa, seguido por uma camada de mais ou menos 13 m de arenito consolidado até a região impenetrável ao amostrador do ensaio. A Fig. 4 mostra o resultado do teste de SPT dos 6 furos com a profundidade ao passo que a Fig. 5 apresenta o resultado da prova de carga estática nas quatro estacas.

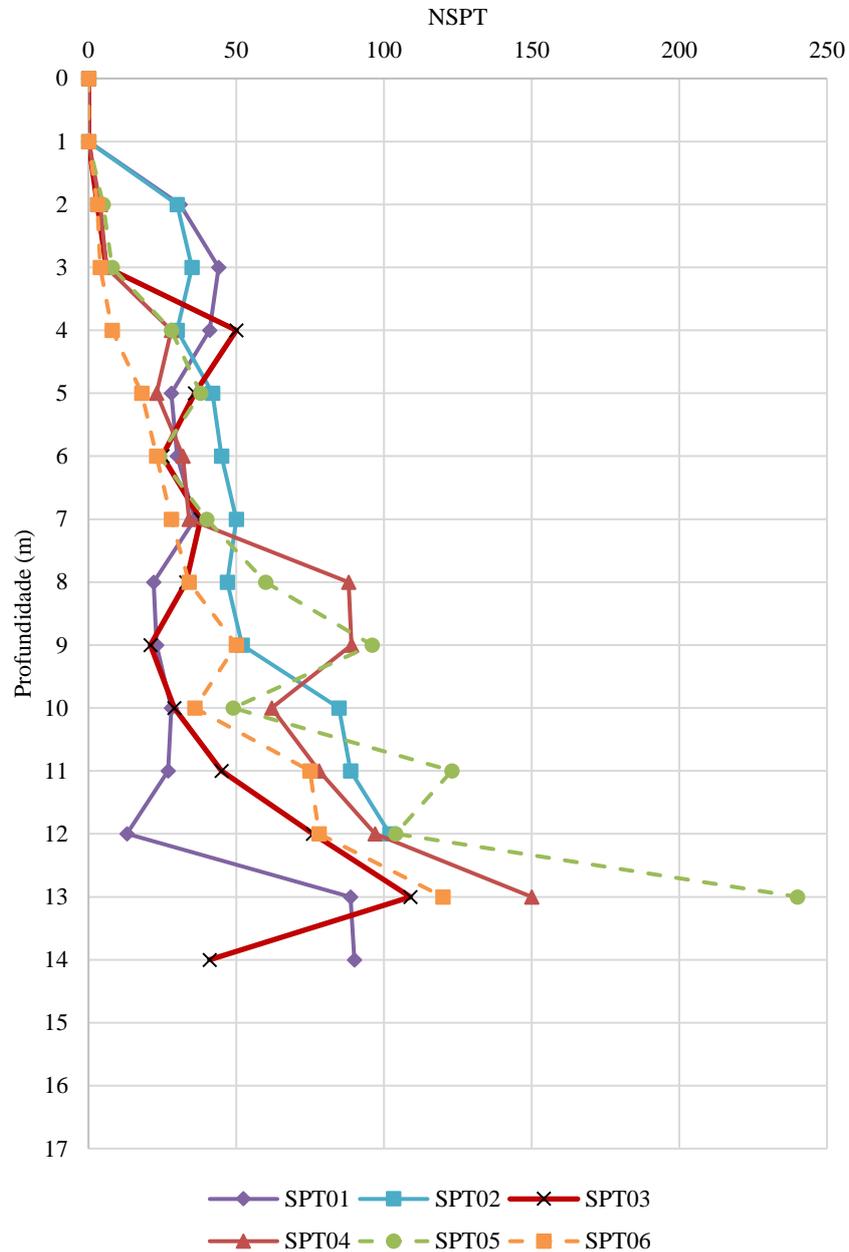


Figura 4. Resultados dos ensaios de SPT. Fonte:FREITAS [2]

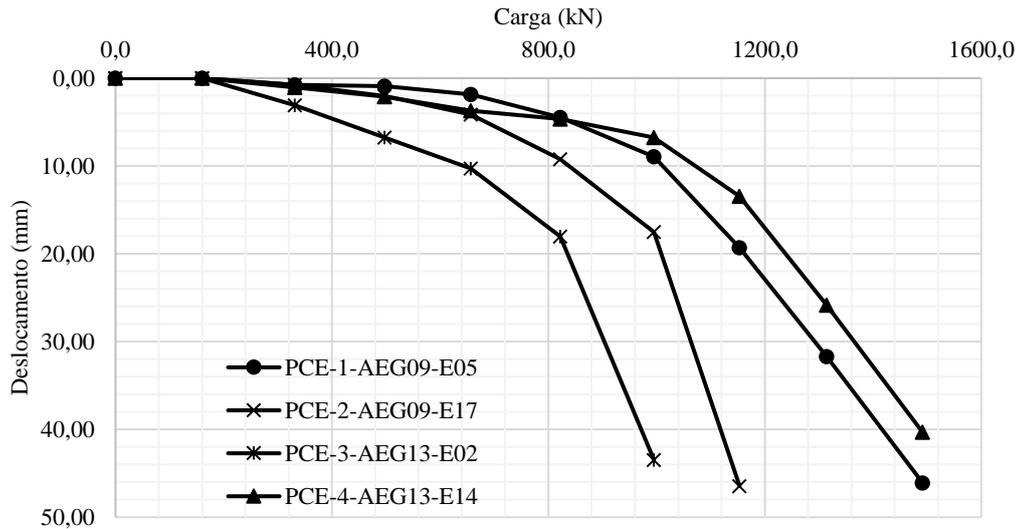


Figura 5. Resultado das provas de carga estáticas. Fonte: FREITAS [2].

2.3 Interação solo-estrutura

O comportamento da interação solo-estrutura (ISE) foi modelado a partir do uso de molas não lineares, isto é, a sua rigidez varia conforme o nível de carregamento. O SAP 2000 admite esse tipo de recurso com o uso de elementos de *link* dotados de características elásticas não lineares. Para a solicitação vertical, foi utilizada a curva PCE-3-AEG13-E02 resultante do ensaio de carga estática das estacas. Essa curva foi escolhida por ser da estaca menos rígida e com menor capacidade de carga. Já o comportamento das estacas quando submetidas a cargas laterais foi modelado utilizando curvas p-y com a formulação trazida em API [3]. A partir dessas curvas foi feito um modelo de estaca isolada da qual foi extraída a curva carga-deslocamento geral da estaca a ser utilizada nos modelos da fundação. A Fig. 6 mostra as curvas p-y e a Fig. 7 traz a curva carga-deslocamento horizontal obtida do modelo da estaca isolada. Não foi considerada a transmissão direta de carga (ou seja, a fundação foi considerada como sendo um bloco de estacas, não um radier estaqueado).

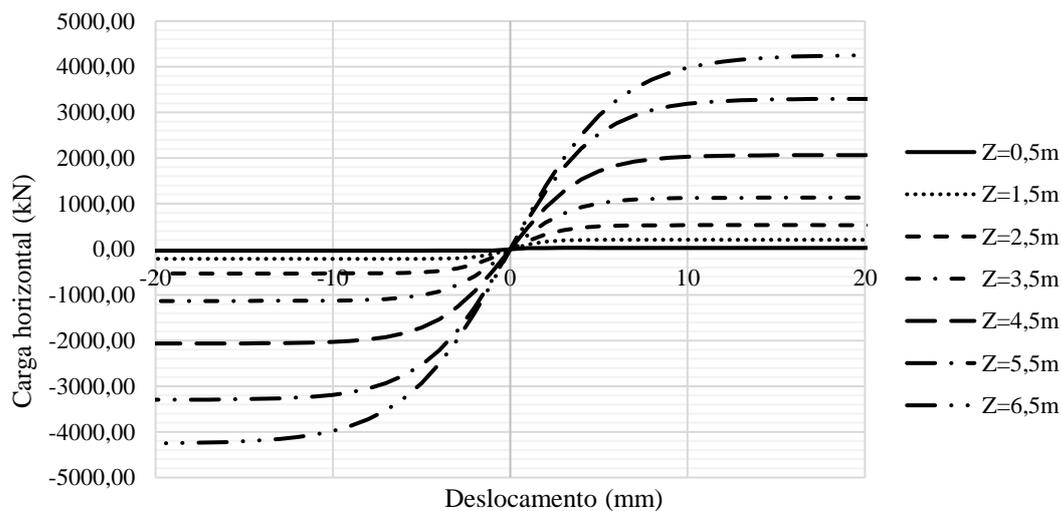


Figura 6. Curvas p-y.

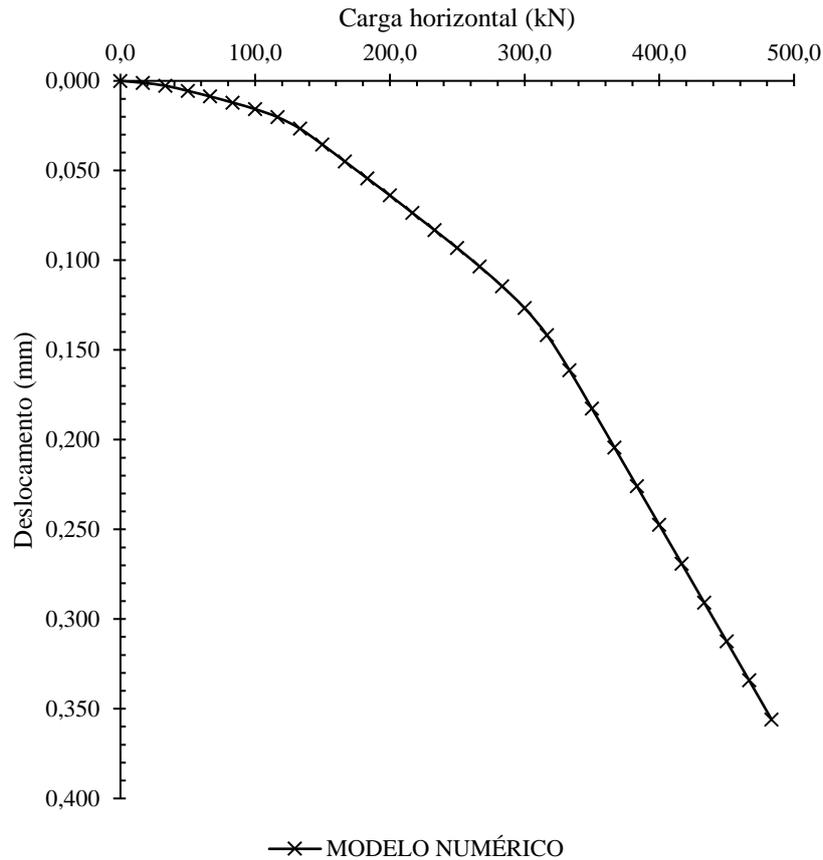


Figura 7. Curva carga-deslocamento lateral da estaca.

2.4 Modelos com elementos de casca

Foram feitos três modelos com elementos de casca (*shell elements*). No primeiro modelo apenas a fundação é modelada e a carga é inserida de maneira pontual em seu nó central. Já nos outros dois modelos, a torre foi modelada também com elementos de casca. O SAP 2000 apresenta duas formulações distintas para os elementos de casca, sendo elas: a casca fina, que utiliza as equações de Kirchhoff e a casca espessa que faz uso das formulações Mindlin/Reissner (CSI [4]). Segundo o próprio manual de análise do programa (CSI [4]) os elementos de casca fina são mais adequados para estruturas lamelares com espessura menor que 1/5 do seu vão livre, sendo recomendado o uso de casca espessa em estruturas com altura maior. Existem outras indicações para o uso de cada elemento, mas que fogem ao escopo do trabalho, de forma que foram adotadas: casca espessa para o pedestal da fundação e casca fina para o restante da fundação, além da torre.

A diferença entre os dois modelos onde a torre também foi modelada está nos elementos da projeção do anel de ancoragem. Em um deles esses elementos foram modelados com o mesmo módulo de elasticidade do concreto da fundação e no outro utilizou-se o módulo de elasticidade do aço (210 GPa). Isso foi feito com o objetivo de simular a grande rigidez fornecida pela gaiola de ancoragem da torre. A Fig. 8 apresenta uma visão geral dos modelos, evidenciando suas diferenças.

O modelo constitutivo adotado tanto para o aço quanto para o concreto foi linear elástico.

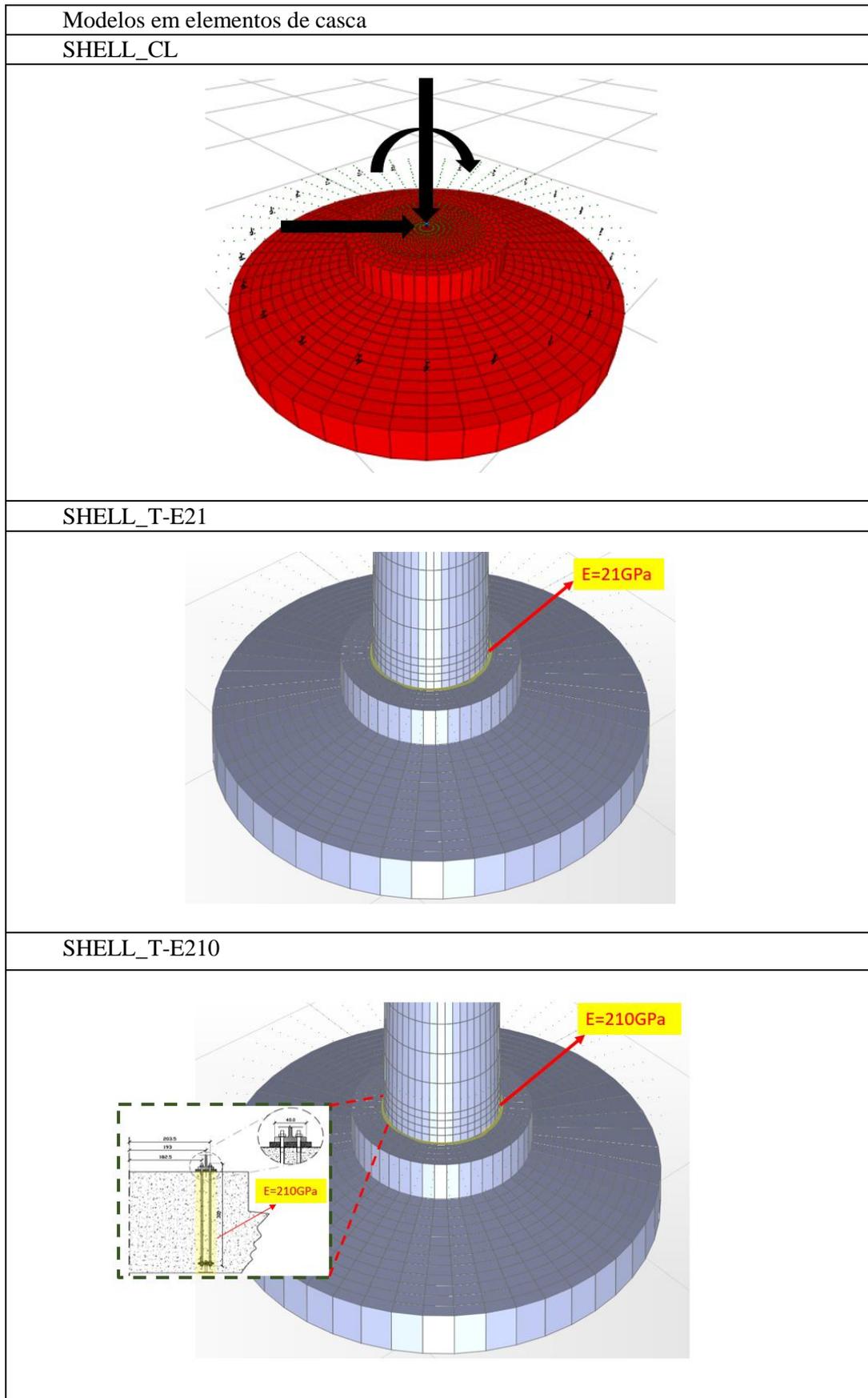


Figura 8. Modelos em elementos de casca.

2.5 Modelos com elementos sólidos

Foram adotados também modelos com elementos sólidos com modelo constitutivo linear elástico. Nesses modelos a torre não foi representada, entretanto, em um dos modelos, a rigidez da ligação torre-fundação foi simulada a partir da adoção de um módulo de elasticidade de 210 GPa nos elementos relativos à gaiola de ancoragem (Fig. 9). No outro modelo esses elementos não tiveram seu módulo de elasticidade alterado. A Tabela 2 sumariza todos os modelos utilizados no trabalho, trazendo sua denominação.

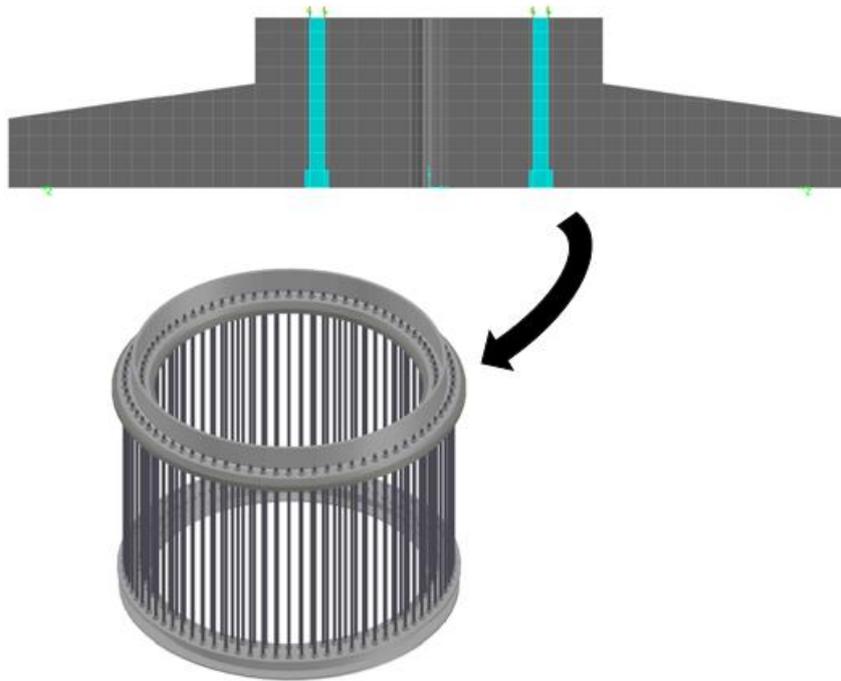


Figura 9. Modelo sólido com elementos da gaiola da ancoragem com $E=210$ GPa.

Tabela 2. Lista de modelos.

Tipo de elemento finito	Denominação	Descrição
Elementos de casca	SHELL_CL	Cargas concentradas no nó central
	SHELL_T-E21	Modelagem acoplada da torre com elementos da gaiola de ancoragem com $E=21$ GPa
	SHELL_T-E210	Modelagem acoplada da torre com elementos da gaiola de ancoragem com $E=210$ GPa
Elementos sólidos	SOLID_E21	Modelo com elementos sólidos com elementos da gaiola de ancoragem com $E=21$ GPa
	SOLID_E210	Modelo com elementos sólidos com elementos da gaiola de ancoragem com $E=210$ GPa

3 Resultados e discussões

Os resultados dos modelos com elementos de casca e de sólidos serão, primeiramente, analisados de forma separada, tentando evidenciar os efeitos da rigidez da torre e do sistema de ancoragem para só então serem debatidos as implicações do uso de diferentes elementos. Foram retirados dos modelos dados relativos aos momentos fletores radiais (M11), esforço cortante radial (V13) e rigidez rotacional na seção mais solicitada (plano de atuação do momento de tombamento da torre).

Primeiramente, tem-se que o resultado dos esforços para o modelo SHELL_CL, isto é o modelo com a carga concentrada, demonstrou uma concentração irreal de esforços, gerando momentos fletores, por exemplo, mais de 10 vezes maiores que os valores encontrados nos demais modelos. Esse comportamento já era esperado, uma vez que cargas de grande magnitude foram inseridas em apenas um nó. Esse modelo mostra, de maneira, até certo ponto, extremada, que a forma como as cargas são inseridas no modelo influencia no resultado final.

Já quando comparados os momentos fletores dos modelos com a torre ver-se que a consideração da rigidez da gaiola de ancoragem diminui o esforço na região central da fundação e aumenta de forma pouco significativa os valores máximos. Um comportamento muito parecido é demonstrado no esforço cortante. A Tabela 3 apresenta os percentuais de redução dos esforços no núcleo da fundação.

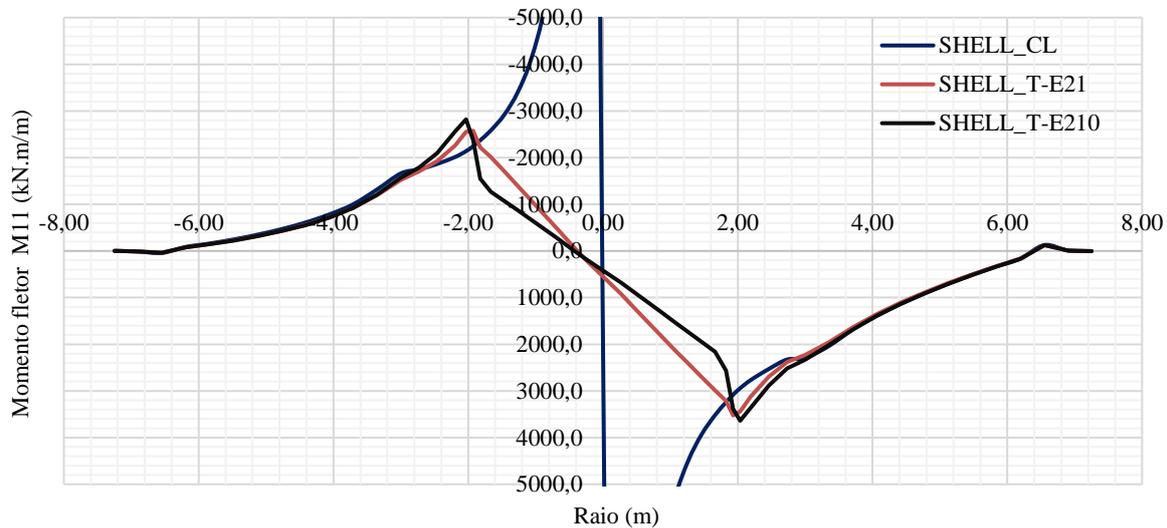


Figura 11. Diagrama de momento fletor na seção mais solicitada.

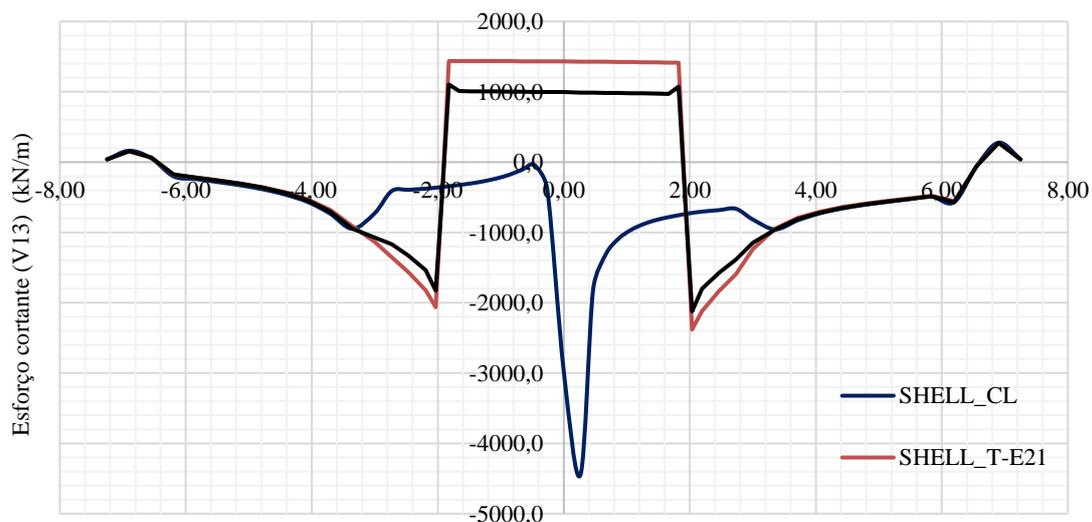


Figura 10. Diagrama de esforço cortante na seção mais solicitada.

Tabela 3. Comparação de esforços nos modelos de casca.

R (m)	M11			V13		
	SHELL_T-E21	SHELL_T-E210	Δ	SHELL_T-E21	SHELL_T-E210	Δ
-3,0	-1523,5	-1568,3	-3%	-1138,7	-1075,4	6%
-2,7	-1705,6	-1785,8	-5%	-1356,6	-1168,0	14%
-2,5	-1924,2	-2098,0	-9%	-1566,2	-1332,5	15%
-2,2	-2256,2	-2560,8	-13%	-1821,9	-1535,9	16%
-2,0	-2554,6	-2819,3	-10%	-2061,3	-1829,1	11%
-1,9	-2574,0	-2378,1	8%	-365,6	-408,4	-12%
-1,8	-2221,3	-1549,3	30%	1436,6	1104,5	23%
-1,7	-2016,3	-1266,9	37%	1436,8	1009,3	30%
-1,5	-1708,4	-1071,7	37%	1436,8	1008,0	30%
-1,3	-1393,2	-871,2	37%	1436,7	1006,5	30%
-1,1	-1077,2	-668,1	38%	1436,4	1004,9	30%
-0,9	-762,6	-463,1	39%	1435,9	1003,2	30%
-0,7	-448,8	-256,2	43%	1435,3	1001,3	30%
-0,5	-133,4	-45,7	66%	1434,4	999,3	30%
-0,3	179,5	165,0	8%	1434,8	998,3	30%
0,0	550,2	419,4	24%	1434,8	998,3	30%
0,3	916,2	672,5	27%	1429,2	990,1	31%
0,5	1221,6	885,5	28%	1428,2	988,2	31%
0,7	1525,1	1099,6	28%	1426,5	985,5	31%
0,9	1822,9	1311,8	28%	1424,7	982,8	31%
1,1	2117,7	1523,7	28%	1422,8	979,9	31%
1,3	2410,1	1735,8	28%	1420,8	977,0	31%
1,5	2700,4	1948,2	28%	1418,6	973,9	31%
1,7	2987,6	2158,9	28%	1416,5	970,9	31%
1,8	3213,7	2567,1	20%	1414,6	1073,2	24%
1,9	3525,3	3383,3	4%	-540,8	-574,7	-6%
2,0	3436,9	3638,8	-6%	-2379,7	-2121,4	11%
2,2	3121,3	3360,0	-8%	-2117,3	-1800,3	15%
2,5	2693,5	2884,1	-7%	-1832,9	-1574,7	14%
2,7	2377,8	2515,3	-6%	-1595,3	-1385,3	13%
3,0	2230,7	2332,3	-5%	-1237,8	-1145,7	7%

Ainda tratando dos modelos com elementos planos, têm-se os gráficos da rigidez rotacional em função do momento de tombamento aplicado. Como os parâmetros de interação solo-estrutura adotados foram não lineares, ou seja, consideram que a rigidez do solo varia com a sollicitação, era esperado que a rigidez rotacional fosse variar. De acordo com os resultados presentes na Fig. 12, conclui-se que não há um impacto relevante na rigidez rotacional da fundação.

Prosseguindo a análise para os modelos com elementos sólidos, tem-se um paradigma bastante semelhante em que o aumento da rigidez na região de ancoragem da torre ocasionou a diminuição de esforços no núcleo da fundação (Fig.13). A distribuição de tensões S11 para os dois modelos foi bastante semelhante (Fig. 15 e 16).

Por fim, com relação à rigidez rotacional foi obtida uma influência pouco relevante, a exemplo do que ocorreu na comparação entre os modelos de casca.

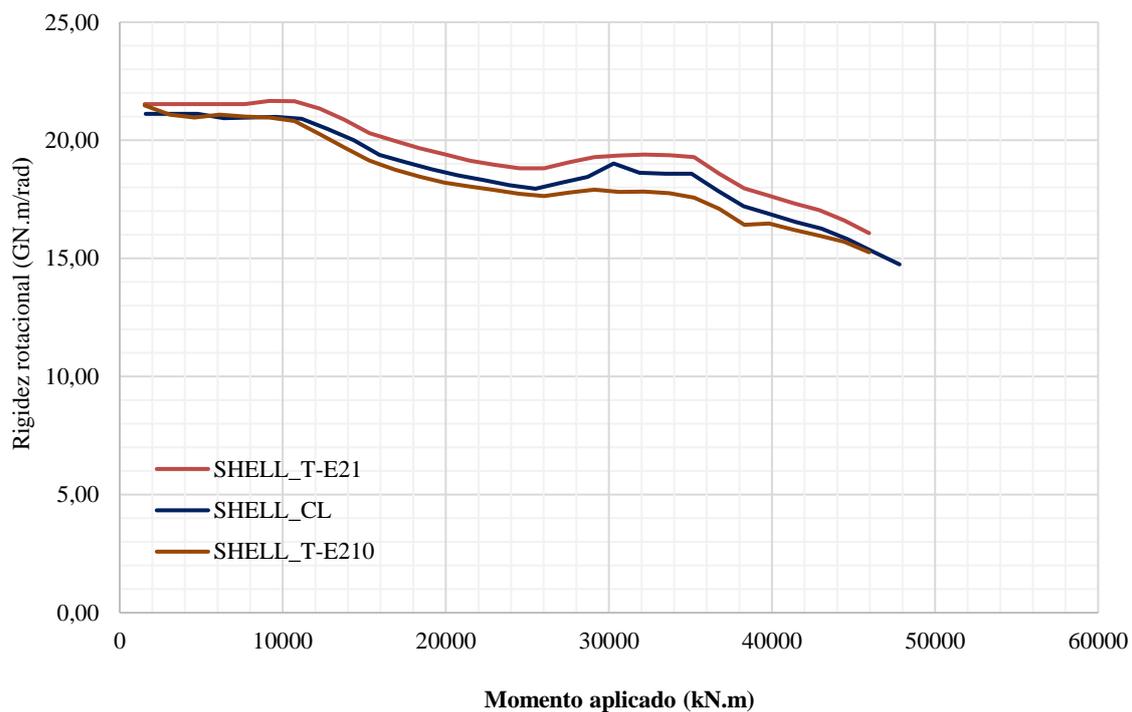


Figura 12. Rigidez rotacional para os modelos de casca.

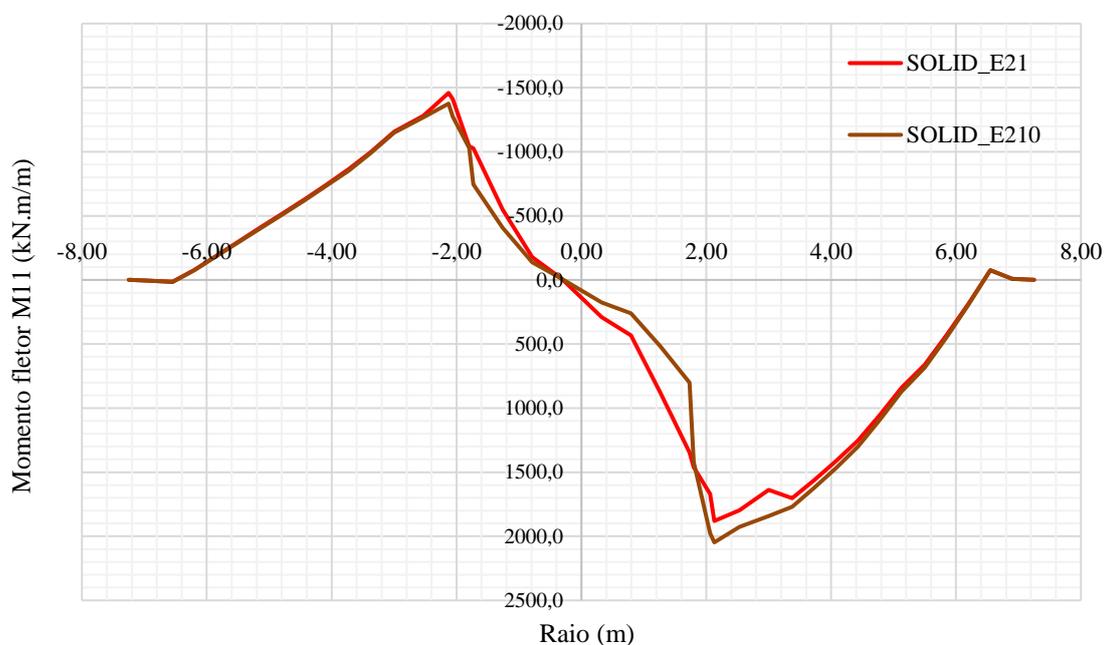


Figura 13. Momentos fletores na seção mais solicitada para os modelos sólidos.

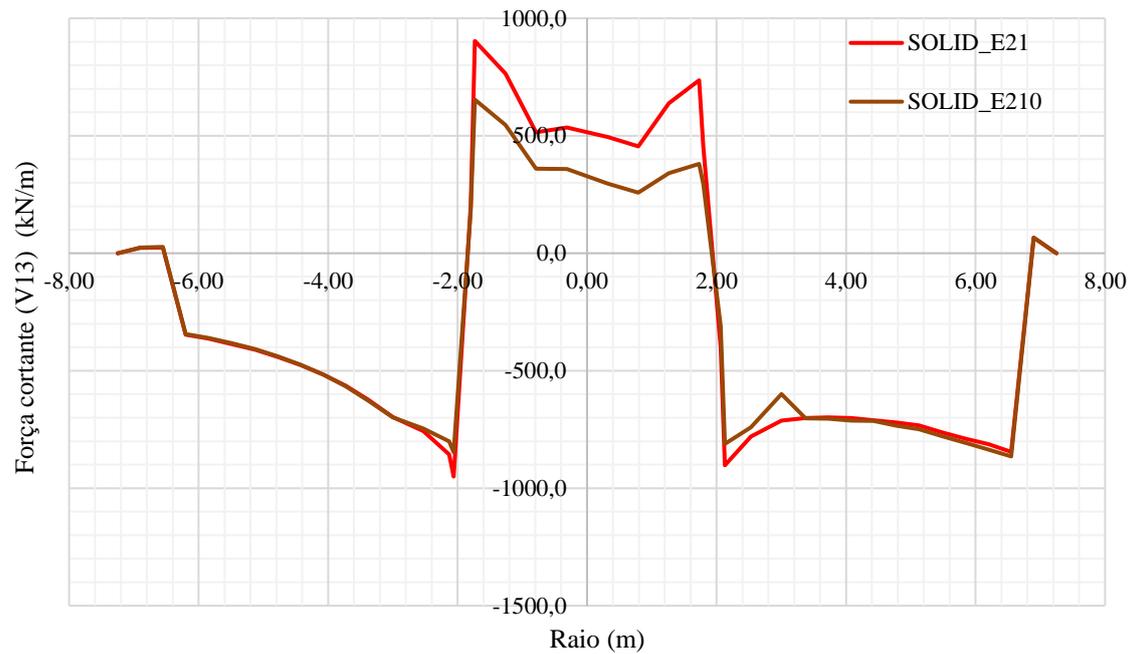


Figura 14. Diagrama de esforço cortante para os modelos de elementos sólidos.

Tabela 4. Comparação de esforços nos modelos de sólido.

R (m)	M11			V13		
	SOLID-E21	SOLID-E210	Δ	SOLID-E21	SOLID-E210	Δ
-3,00	-1156,4	-1148,9	1%	-696,9	-699,1	0%
-2,53	-1280,7	-1269,8	1%	-757,2	-746,1	1%
-2,13	-1458,7	-1375,2	6%	-857,0	-800,4	7%
-2,06	-1410,1	-1273,1	10%	-950,6	-846,7	11%
-1,80	-1042,7	-1030,0	1%	200,0	180,1	10%
-1,73	-1025,9	-746,3	27%	903,3	653,6	28%
-1,26	-549,8	-407,4	26%	764,6	546,7	29%
-0,79	-177,7	-138,4	22%	514,1	359,5	30%
-0,31	-9,6	-8,8	8%	535,1	359,2	33%
0,32	290,3	176,3	39%	494,8	295,7	40%
0,79	432,2	261,2	40%	454,6	258,6	43%
1,26	878,8	517,4	41%	639,0	341,5	47%
1,73	1346,0	801,6	40%	735,9	380,7	48%
1,80	1462,3	1421,0	3%	454,3	294,7	35%
2,06	1669,3	1976,5	-18%	-399,8	-310,7	22%
2,13	1880,4	2047,2	-9%	-902,0	-812,2	10%
2,53	1796,9	1926,5	-7%	-779,7	-741,0	5%
3,00	1637,4	1841,2	-12%	-712,5	-599,7	16%

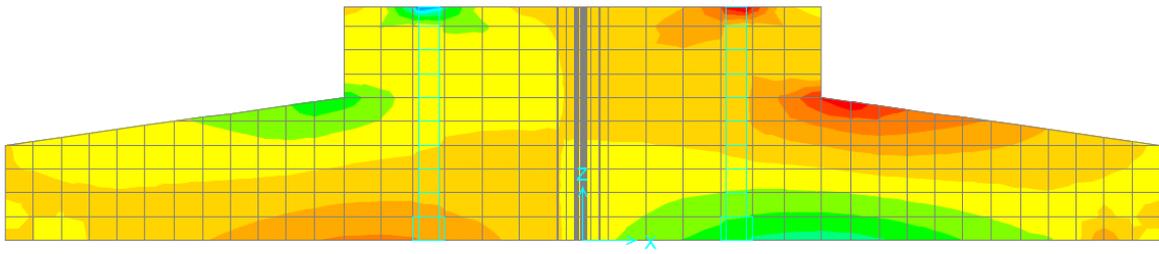


Figura 15. Distribuição de tensões S11 na fundação (SOLID-E21).

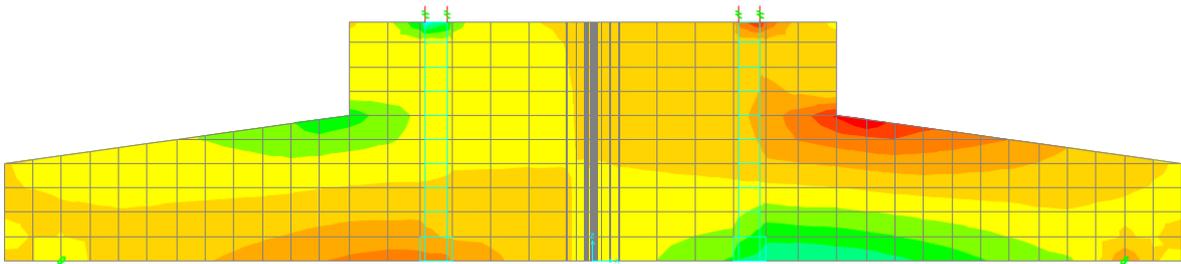


Figura 16. Distribuição de tensões S11 na fundação (SOLID-E210).

A Fig.17 mostra uma comparação entre os valores de momento fletor máximo para todos os modelos, em que é possível ver que os modelos sólidos tendem a ter esforços menores que os modelos de casca.



Figura 17. Comparação entre os momentos máximos.

4 Conclusões

Diante dos resultados obtidos no presente estudo é possível chegar a algumas conclusões em relação ao tema. Primeiramente, tem-se que, de fato, a consideração da rigidez da ligação torre-fundação tem influência nos esforços internos da fundação. Essa influência se mostrou, tanto quando utilizados elementos de casca quanto elementos sólidos, em proporções parecidas, diminuindo os momentos fletores e esforços cortantes na região central da fundação.

Entretanto, há que se ter em mente que a rigidez simulada nos modelos propostos provavelmente não é a mesma que atua na fundação, uma vez que no caso real todas as barras de ancoragem recebem protensão tornando o conjunto ainda mais rígido, o que, em tese, diminuiria ainda mais os momentos no núcleo podendo alterar, inclusive, os esforços nas demais regiões da fundação.

Com relação à rigidez rotacional, os dados mostram que há uma redução do parâmetro com o aumento do nível de carregamento, entretanto, as diferentes condições de aplicação das cargas da torre tiveram pouca influência nessa redução.

Por fim, a comparação entre os momentos fletores dos cinco modelos mostrou um aumento dos valores de momentos fletores máximos com a mudança de rigidez dos elementos do anel de ancoragem e mostrou que os elementos sólidos fornecem valores bem menores de esforços.

Referências

- [1] (2012), Renewable energy technologies: cost analysis series, Volume 1: Power sector, Issue 5/5. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- [2] FREITAS, A. P. S. de. Comportamento de radiers estacados como fundações de aerogeradores de energia eólica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.
- [3] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore platforms — Working Stress Design. API Publishing Services. Washington, D. C, 2005.
- [4] SAP2000, Structural Analysis Program. Computers and Structures, Inc. University Ave. Berkeley, California, 1995.