

Análise da Interação Solo-Estrutura das Fundações de Unidades Aerogeradoras.

Fernanda Maciel Gavioli

Unicamp, Campinas, Brasil, fernandagavioli@apoioapf.com.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@fec.unicamp.br

RESUMO: O crescimento e desenvolvimento, mundial e brasileiro, de energias renováveis e limpas vêm demonstrando que é necessário o estudo de métodos de análise, dimensionamento e execução de projetos relacionados às obras de estruturas eólicas a fim de se aproximar a uma situação mais próxima a realidade da obra e evitar qualquer tipo de patologia futura. O presente trabalho trata da consideração da Interação Solo-Estrutura (ISE) em projetos estruturais de bases de torres aerogeradoras armadas sobre fundações superficiais do tipo “sapatas isoladas”. Sendo assim, será apresentado um estudo de caso no qual tem por objetivo comparar os resultados da análise da interação solo-estrutura, avaliando a rigidez e deformação das sapatas. Para a realização do estudo foi utilizada a ferramenta computacional Strap 2015 - programa desenvolvido pela empresa Atir Engineering Software Development Ltda - o qual permite realizar uma análise estrutural pelo método de elementos finitos. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram avaliar de forma comparativa a relevância da consideração da interação solo-estrutura, mais especificamente a deformabilidade das sapatas.

PALAVRAS-CHAVE: Aerogeradores, Interação solo-estrutura, Método dos Elementos Finitos.

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento e desenvolvimento deste “novo” tipo de geração de energia mostra a necessidade de se realizarem estudos mais detalhados sobre os processos específicos, dimensionamento, execução e peculiaridades sobre este tipo de obra. As torres eólicas são compostas basicamente por duas partes: a superestrutura em que todos os maquinários e estrutura sobre o solo estão incluídos e a infraestrutura, que é constituída pelas estruturas de transição e fundações.

As fundações são definidas como elementos estruturais que tem como principal função transmitir a carga da superestrutura ao solo, não provocando nenhum processo de ruptura do terreno ao redor da fundação ou do próprio elemento de ligação, cujos recalques possam ser absorvidos pelo conjunto estrutural. Portanto, a determinação do tipo de fundação para qualquer

projeto estrutural, em especial as torres eólicas, é etapa fundamental para um bom desenvolvimento do projeto e funcionamento ao longo de sua vida útil, considerando a magnitude e o custo que estas obras possuem.

No passado era frequente a análise do subsolo e da estrutura de forma independentes; tipicamente os engenheiros estruturais consideravam os apoios indeslocáveis e todos os cálculos dos esforços eram realizados nestas condições. Os projetos de fundações, por consequência, eram elaborados com base nos carregamentos originados da primeira fase de projeto. Desta maneira, não se levava em consideração a influência da rigidez da superestrutura, o nível de deformação que o solo era submetido durante a construção e a vida útil da edificação.

O cenário atual evidencia que ainda é comum se calcular estruturas ignorando a presença de uma estrutura deformável sob a

base, porém, felizmente, o assunto interação solo-estrutura, juntamente com sua aplicabilidade, vem sendo disseminados dentre o meio acadêmico e também profissional. A literatura sobre o tema Elementos Finitos é ampla e nos demonstra uma crescente evolução. Vários tipos de obras vêm sendo estudadas, com a aplicação da interação solo-estrutura, tais como edifícios, túneis, edificações, obras de arte e, como no caso deste artigo, às torres eólicas.

Neste trabalho serão abordadas as diretrizes e conceitos básicos de um projeto de fundações de aerogeradores, juntamente com um estudo de caso demonstrando a influência da interação solo-estrutura por meio do método de elementos finitos. O estudo será realizado com base no projeto de fundações do “Complexo Eólico Serra das Vacas” localizado no município de Paranatama – PE.

2. POTENCIAL EÓLICO MUNDIAL

A energia eólica pode ser definida como a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, sendo considerada renovável e limpa devida sua matéria prima. O aproveitamento da energia eólica ocorre por meio da conversão de energia cinética de translação em energia cinética de rotação, através da utilização de turbinas eólicas, denominadas aerogeradores.

Após a crise internacional do petróleo em 1970, as grandes potências iniciaram o desenvolvimento de tecnologias ligadas à geração de energia eólica, tendo como principal objetivo a diversificação da matriz energética e a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis, podendo-se destacar os EUA e alguns países da Europa.

Segundo o GWEC (2014), foi atingido o recorde de crescimento em geração de energia eólica no ano de 2014, chegando à marca de 50 GW pela primeira vez. Porém, essa marca foi ultrapassada, chegando a mais de 51 GW instalados, um crescimento significativo quando comparado com o crescimento da capacidade de geração de energia eólica total no ano de 2013, aproximadamente 35,6 GW de potência. Apresenta-se na Figura 1 a distribuição do

potencial eólico instalado por ano no mundo, totalizando 51.473 MW no ano de 2014.

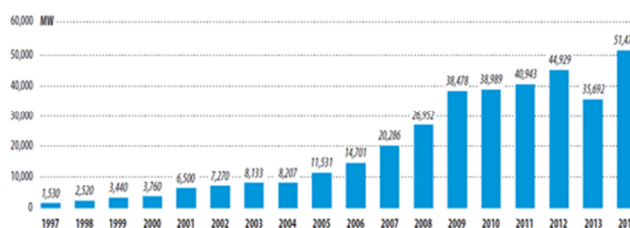


Figura 1. Potencial eólico instalado por ano no mundo.

Fonte: Global Wind Energy Report – Annual Market Update 2014.

3. POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Segundo a ANEEL, embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores significativos. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20 GW. Entretanto, atualmente estudos indicam valores superiores a 60 GW. Essas divergências ocorrem devido a adoção de diferentes metodologias de análise.

No Brasil houve a criação do Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), o principal objetivo do programa era ampliar a participação das fontes alternativas na matriz elétrica brasileira (energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidroelétricas PCH no Sistema Elétrico Interligado Nacional - SIN). O programa foi instituído em 2004, com previsão para funcionamento dos sítios de geração de energia em 2010. O Proinfa foi o responsável pela inclusão do país entre o ranking mundial Top10 em energias renováveis no ano de 2012.

4. AEROGERADORES

As turbinas eólicas podem ser classificadas quanto à forma de aproveitamento eólico, arraste ou de sustentação. Atualmente, são comercializados aerogeradores com eixo horizontal, com um número ótimo de três pás, pois nessa situação ocorre uma melhor distribuição de tensões durante a rotação da máquina para acompanhar a direção do vento.

O padrão de aerogeradores utilizados para

geração de energia elétrica é constituído por alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não flexível.

5. CARREGAMENTOS

Os aerogeradores possuem altura compreendida no intervalo de 75 a 120 m, com pás de 35 a 70 m, de acordo com a potência requerida em projeto. A vida útil de um gerador é de 20 anos ou aproximadamente 175.000 horas. Os carregamentos neste tipo de estrutura são considerados elevados. Desde as hélices até à fundação, os carregamentos se comportam de forma cíclica e alternada. Qualquer componente pode apresentar danos ao longo do tempo, devido à ocorrência do efeito de fadiga e também aos estados limites de utilização e de serviço nos quais os aerogeradores são submetidos.

Neste artigo, os carregamentos, incluindo os estados limites, foram fornecidos pelo fabricante, neste caso a *General Eletrics*, no documento "*Foundation Load Specification for Wind Turbine Generator Systems* (1.7 X - 100/60Hz 100 m Rotor Diameter with 79,7 m HH) IEC WTGS Class S SW e CWE - SE Power & Water, o mesmo fornece cargas de trabalho em duas situações, *Standart Weather* (SW) onde é considerado o tempo padrão e *Cold Weather Extreme* (CWE) onde é considerado o tempo Frio Extremo.

6. INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

O processo de interação solo-estrutura (ISE) nada mais é do que a influência recíproca gerada entre a superestrutura e o sistema de fundação, iniciando-se ainda na fase de construção e estendendo-se até que seja obtido um estado de equilíbrio: tensões e deformações estabilizadas, tanto da estrutura como do maciço de solos (COLARES, 2006).

No passado, a consideração do processo de interação solo-estrutura no processo de dimensionamento, devido à complexidade dos cálculos, era considerada inviável. Com o desenvolvimento de softwares e avanços tecnológicos, possibilitou a adoção de critérios

que considerassem a interação solo-estrutura, embora a grande maioria dos engenheiros ainda opte por hipóteses que consideram o solo rígido (SOUZA E REIS, 2008). O mecanismo de interação solo-estrutura está também associado a uma série de fatores e/ou variáveis como tipos de carregamentos atuantes, processo construtivo, forma em planta da edificação, edificações vizinhas, rigidez relativa estrutura-solo, entre outros.

Existem vários modelos para considerar a ISE nos projetos estruturais, porém, em virtude da simplicidade, o mais utilizado nos dias de hoje nos escritórios de projeto são os que separam o sistema estrutural do maciço de solo, podendo haver a discretização ou não da estrutura de fundação. Há várias décadas, profissionais das áreas de engenharia e geotecnia vêm estudando aplicabilidade e efeitos devido à consideração da ISE.

Em 1867, Winkler propôs um modelo admitindo que as cargas aplicadas na superfície do solo geravam deslocamentos somente no ponto de aplicação da mesma, não sendo considerada a continuidade do meio. Desta forma, o maciço de solo poderia ser substituído por um sistema de molas com uma rigidez equivalente, um método simples de se considerar a interação solo-estrutura, denominado como modelo de Winkler. Existem muitos trabalhos que utilizam a técnica de Winkler para representação da flexibilidade do solo por se tratar de uma análise fácil de ser implementada. Geralmente, são utilizadas correlações empíricas e/ou tabeladas na determinação dos coeficientes de mola. Porém, o modelo não contempla a continuidade do solo.

Segundo Chamecki (1954), o procedimento convencional de cálculo de estruturas utilizado na época era alvo de críticas, pois apesar de apresentar um desempenho aceitável em função da hipótese de que os apoios das estruturas hiperestáticas se adaptam a deformação do solo, o mesmo nos apresentava resultados que se afastavam da realidade, principalmente se considerado o número de pavimentos de uma edificação. Através destes estudos, o autor propôs um sistema de cálculo para análise de interação solo-estrutura, sendo que a partir das reações de apoio da estrutura calculada como

indeslocável e dos coeficientes de transferência de carga de reações verticais causados pelos recalques unitários de cada apoio separadamente, calcula-se os recalques da fundação. Iniciando um processo iterativo, que considera a rigidez da estrutura e fornece novas reações de apoio, sendo obtidos novos valores de recalques. Este processo iterativo é repetido até que os valores das reações de apoio e novos recalques apresentem convergência entre si. Com a aplicação desta metodologia, verificou-se que os recalques diferenciais apresentam menor magnitude quando se leva em conta a rigidez da estrutura.

No Brasil o desenvolvimento de pesquisas ligadas a interação solo-estrutura vem sendo crescente ao longo dos últimos anos. Dentre os principais autores podemos destacar: Holanda Junior (1998), que analisou os efeitos da ISE em edifícios sob fundações diretas, levando em consideração o processo construtivo e a presença de uma camada indeslocável no perfil do solo, se aproximando da realidade do sistema. O autor demonstra que as modificações nos esforços entre as peças estruturais são significativas; Gusmão Filho (1998) ressalta a importância de se levar em conta a redistribuição entre as cargas da edificação devido aos recalques diferenciais e totais, e quão influenciáveis é este remanejo para a segurança da estrutura.

Comparações com resultados obtidos em campo têm sido muito importante para validação dos modelos teóricos que consideram a ISE, podendo citar a publicação de Jordão (2003) que realizou a análise de estabilidade global de edificações com fundações profundas levando em consideração a deformabilidade do solo, comparando os resultados com modelos teóricos com dados reais de monitoramento de recalques. Gonçalves (2004) também realizou um monitoramento de recalques em edifícios, focando a observação da redistribuição de cargas.

Svensson (2010) estudou e comparou três modelos de fundação de torre de gerador eólico: uma em fundação superficial, outra em fundação estacada em que a resistência se dá pela ponta da estaca e a última também em fundação estacada, mas em condições que a resistência se dá pela ponta e pelo atrito lateral.

O autor concluiu que as três possibilidades são viáveis, com base nas análises em elementos finitos.

Ribeiro (2014) foi responsável pela adaptação dos conceitos de fadiga em concreto armado em projetos de pontes para projetos de fundações de aerogeradores. Ressalta que é razoável a probabilidade de apresentar qualquer dano ao longo do tempo, devido à fadiga do concreto armado já que estas estruturas são submetidas a carregamentos cíclicos e alternados.

Uma maneira simples para considerar a deformabilidade dos solos foi relatada por Scarlat (1993, empregando se uma série de molas discretizadas sob a base da fundação. As molas são representadas pelo coeficiente de apoio elástico (mola) K_s^v (kN.m^{-1}) o qual é diretamente proporcional ao módulo de reação K_m e à área carregada A_f , conforme mostra a equação a seguir:

$$K_s^v = \frac{K_m}{A_f} \quad (1)$$

Esta simplificação tem como base a Hipótese de Winkler, e não considera a presença das molas adjacentes, logo, a tendência é que os erros sejam maiores no caso de solos pouco rígidos, o que não acontece no solo em estudo, já que a principal característica é sua alta rigidez e resistência, justificando então a adoção de fundações diretas. Pela Hipótese de Winkler, a deformação vertical é dada pela Equação.

$$\rho(x, y) = \frac{\sigma(x, y)}{K_s^v} \quad (2)$$

Em que:

$\sigma(x, y)$ é a tensão de contato média na base da fundação;

$\rho(x, y)$ é o deslocamento vertical (recalque);

K_s^v é o módulo ou coeficiente de reação vertical.

Normalmente, costuma-se assumir $K_s = K_s^v = K_s^h = K_s^f$, entretanto, vários ensaios têm demonstrado que tais valores são diferentes. Isso ocorre uma vez que o módulo de reação K_s não é uma constante do solo e depende de uma série de fatores, tais como: forma e dimensões da fundação, tipo de construção e flutuações de

carregamento.

Em geral, o coeficiente K_s pode ser determinado de três maneiras: ensaios de placa, tabelas de valores típicos e por meio de correlações com o módulo de elasticidade. É possível encontrar na bibliografia tabelas com valores típicos ou padronizados para coeficientes de reação vertical. Terzaghi (1955) a partir de ensaios de placa cujas dimensões eram $30 \times 30 \text{ cm}^2$ elaborou uma tabela com valores padronizados para o coeficiente de reação vertical. Os valores encontrados se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de K_s (kN/m^3) de acordo com Terzaghi (1955).

Argilas	Rija	Muito Rija	Dura
q_u (MPa)	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	>0,4
Faixa de Valores	16.000 a 32.000	32.000 a 64.000	>64.000
Valor Proposto	24.000	48.000	96.000
Areias	Fofas	Medianamente compacta	Compacta
Faixa de Valores	6.000 a 19.000	19.000 a 96.000	96.000 a 320.000
Areia acima N.A	13.000	42.000	160.000
Areia Submersa	8.000	26.000	96.000

É importante ressaltar que esta não é a forma mais adequada para adoção dos coeficientes de reação vertical, porém supre a necessidade de se obter um valor, permitindo assim a consideração da deformabilidade do solo. Para este trabalho, foi adotado um valor do coeficiente de rigidez do solo de 40.000 kN/m^3 . Devido a simetria da peça em todas as direções, e apresentando carregamentos distribuídos uniformemente ao longo da estrutura, a variação do K_v não apresenta efeitos significativos no dimensionamento estrutural da sapata.

7 DADOS DA OBRA

Para a elaboração do projeto em estudo, foram colocados à disposição os seguintes documentos: Esforços atuantes nas fundações, fornecidas pelo projetista estrutural responsável (Structurale); Boletins de sondagem mistas e rotativas, executadas pela empresa: Minas Solos Sondagens Ltda.; Projetos de fundações para todas as unidades Aerogeradores; Relatórios técnicos e memoriais de cálculo disponibilizados pelas empresas contratadas para elaboração dos projetos de fundação e também auditoria dos mesmos e Informações do Aerogerador tipo GE 1.7-100 m Rotor

Diameter, fornecidas pela GE Power and Water (Technical Specification).

7.1 Caracterização Geotécnica

De acordo com as sondagens disponíveis, foi detectada superficialmente uma camada de solo coluvionar, composta por areia fina e siltosa, compacta, cor cinza, com $N_{SPT} \leq 38$ e espessura média de 3,0 m. Subjacente a esta camada, foi detectada uma camada de silte argilo arenoso e areia fina com fragmentos de rocha, compacto a muito compacto de cor amarela, com N_{SPT} variando entre 39 e 60. Abaixo desta, foi detectada uma camada de granito gnaisse, muito alterado e fragmentado a pouco fraturado e fragmentado, estas camadas de granito gnaisse foram encontradas até os limites sondados. Não foi detectado nível d'água do lençol freático.

Com base nas características do subsolo local, foram analisadas várias alternativas de fundação, sendo definida como as mais viáveis, tanto no aspecto técnico como econômico, dois tipos de fundações distintas: Quando o subsolo apresenta-se a pequenas profundidades um solo de alta resistência ou uma alteração de rocha, optaria-se por uma sapata sobre este solo, com taxa de trabalho de 350 kPa. Quando o subsolo apresenta-se solo com alta capacidade de resistência ou alteração de rocha a profundidade média, a solução será em estaca do tipo "Raiz".

Existem vários métodos tradicionais de cálculo para definição da taxa de trabalho do solo, dos quais podemos destacar Terzagui, Skempton, Meyerhof. É muito comum a utilização de métodos empíricos de cálculo da taxa de trabalho do solo, conforme apresentado por Alonso (2010), onde a tensão admissível do solo máxima suportada é calculada pela fórmula abaixo:

$$\sigma_{adm} \cong \frac{N_{spt}}{50} \cdot 10^3 (\text{kN/m}^2) \quad (3)$$

É importante salientar que foi adotada uma taxa de trabalho de caracter conservador, podendo ser justificada pelos seguintes aspectos:

- Região com muitas bases eólicas e de difícil acesso, prejudicando a execução e a velocidade das campanhas de sondagem.
- Não se tem conhecimento da idoneidade das

empresas responsáveis pela execução das campanhas de sondagem, não sendo possível confiar em todos os dados.

- Não foram realizados ensaios adicionais para aferir parâmetros geotécnicos do solo, que foram obtidos com base nas sondagens e também com as visitas do engenheiro geotécnico responsável pela análise tática visual do solo.

7.2 Solução de Projeto

A solução de fundação direta em sapata consiste em bases isoladas circulares, com raio de 8,2 m, com tensão admissível de 350 kPa, assentes sobre solo ou alteração de rocha com $N_{SPT} \geq 28$. Adicionalmente as sapatas, 12 chumbadores passivos foram distribuídos uniformemente ao longo de um círculo de raio igual a 7,7 m, a 0,5 m da borda da sapata, com carga máxima de trabalho de 390 kN, com dois critérios de embutimento: Quando houvesse a presença de solo ou alteração de rocha ($N_{SPT} \leq 70$), recomendava-se que o chumbador tivesse 3,0 m embutidos em solo e 3,5 m em rocha. O segundo critério foi adotado quando não havia presença de solo ou alteração de rocha, sendo definido um comprimento mínimo de embutimento em rocha de 5,5 m.

Para o dimensionamento das sapatas através do método rígido, suas dimensões em planta foram obtidas com a verificação das pressões no solo (cálculo geotécnico). A área necessária em planta para a sapata, sendo função da pressão admissível para o terreno, foi calculada pela equação 3 a seguir (MONTROYA et al., 2007):

$$A = \pi \cdot r^2 = \frac{N + P}{\sigma_{adm}} \quad (4)$$

Em que:

A = área da sapata; r = raio da base da sapata; N = carga de serviço; P = peso próprio; σ_{adm} = tensão admissível do terreno.

A modelagem numérica foi realizada com a utilização do software Strap 2015, cuja empresa responsável é a Atir Engineering Software Development Ltda. Este programa é utilizado para análises bidimensionais com método dos

elementos finitos e consideração de características elasto-plásticas dos materiais constituintes.

Através dos valores obtidos para ambos os métodos aplicados (rígido e deformável), foi possível compará-los e assim verificar quais as vantagens, desvantagens e principalmente qual método mais se aproxima da realidade. As variáveis a serem analisadas foram: tensão de borda nas sapatas e tração nos chumbadores.

Tabela 02. Valores de Tensão (kPa) de acordo com o método rígido.

Tipos	N (kN)	M (kN.m)	$\sigma_{média}$ (kN/m ²)	$\sigma_{máx/mín}$ (kN/m ²)	$\sigma_{corrigida}$ (kN/m ²)	$e/r \leq 0,59$
SW	12448,6	53143,7	59	182/-64	224	0,521
SW sem FS	11479,6		54	177/-68	236	0,565
SW	12676,1	58458	60	195/-75	259	0,562
com FS	11707,1		55	-	-	-
CWE	12424,2	44399	59	161/-44	177	0,436
sem FS	11455,2		54	157/-48	180	0,473
CWE	13266,2	54189	63	188/-62	223	0,498
com FS	12297,2		58	183/-67	233	0,537

Para o cálculo da tensão corrigida foi utilizado o método de cálculo para sapata circular carregada excêntrica, conforme apresentado abaixo.

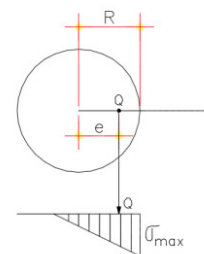


Figura 2. Sapata Circular carregada excêntrica. FONTE: Fundações I. COPPE/UFRJ. 2ª Edição.

$$e \leq k_1 \quad (5)$$

$$q_{max} = \frac{V}{A} \left(1 + \frac{e}{k_1} \right)$$

$$e \geq k_2, \text{ impossível}$$

$$k_1 \leq e \leq k_2 \quad (6)$$

$$q_{max} = \frac{V}{A} \cdot \frac{2e}{k_1} \left[1 - 0,7 \left(\frac{e}{k_1} - 1 \right) \left(1 - \frac{e}{k_2} \right) \left(1 + \frac{r}{R} \right) \right]$$

Para o processamento em elementos finitos foram considerados os valores da Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros Adotados - MEF.

Solo	
Coefficiente de Rigidez K_v	40000 kN/m ³
Chumbador	
Rigidez equivalente K	56000 kN/m
Elasticidade $E_{aço}$	20000 kN/cm ²
Área	14 cm ²

O solo foi simulado pelo modelo de Winkler com o desligamento das molas de esforços a tração.

Apresenta-se a seguir a envoltória de tensões das combinações de estado limite último (ELU) - caso mais crítico (Figura 3).

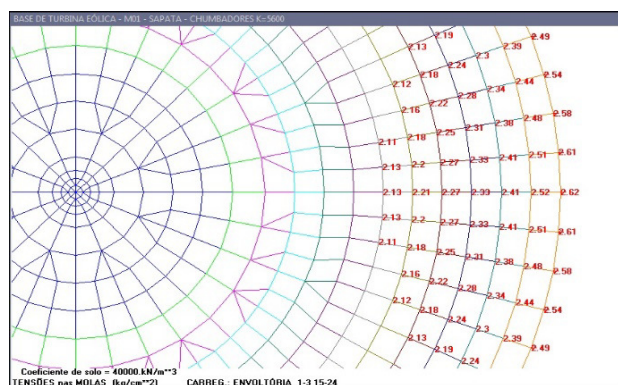


Figura 3. Envoltória de Tensões - ELU (MEF).

A tensão máxima aplicada ao solo apresentada nos processamentos é de 262 kPa. Se comparada com o valor máximo de tensão obtido pelo método rígido (259 kPa) pode-se verificar que estão muito próximas. Porém, ambos os valores apresentados, são inferiores a 350 kPa (tensão máxima admissível do solo), devido a presença dos chumbadores, que trabalham somente a tração, justificando assim a diminuição da tensão máxima.

A determinação da tração máxima nos chumbadores foi realizada com a verificação da sapata ao tombamento e adotando como fator de segurança mínimo igual a 2,0. O que nos resultou em um valor de 364 kN.

Apresenta-se na Figura 4 a envoltória de forças dos tirantes, com combinações de estado limite último (ELU) - caso mais crítico.

A tração máxima aplicada foi de 474 kPa (considerando um valor do coeficiente de mola do chumbador de 56000 kN/m - Figura 04). Mesmo com essas diferenças, o comportamento da estrutura deverá ser satisfatório. Como visto nas simulações, qualquer aumento de comprimento diminui significativamente o

valor do coeficiente de mola K. Também com deformações ligeiramente maiores, ocorre essa diminuição, acarretando na diminuição da carga de trabalho do chumbador.

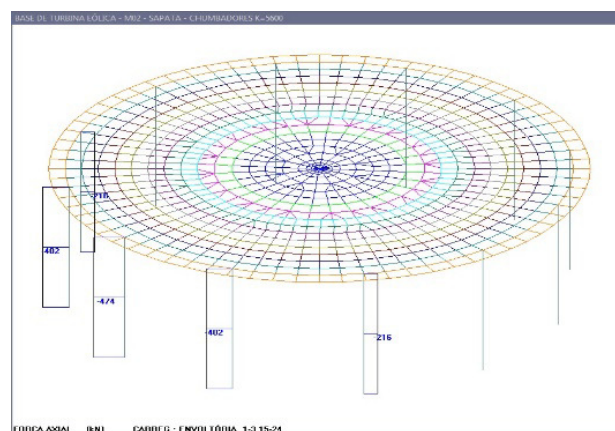


Figura 4. Envoltória de Forças - ELU (MEF).

8 CONCLUSÃO

Demonstrou-se neste trabalho os principais esforços atuantes na estrutura e a influência da consideração da deformação do solo no sistema formado pela superestrutura, infraestrutura e maciço.

Considerando a magnitude do projeto, a necessidade de mitigação de erros e aproximação com a realidade, foram apresentadas duas vertentes de cálculo de projeto, desconsiderando a deformação do solo (Método Rígido) e considerando a mesma variável (Método Elementos Finitos). Pelo fato das torres eólicas sofrerem ação de cargas dinâmicas cíclicas, o dimensionamento de suas fundações difere em certos aspectos das estruturas de edificações comuns, tendo em vista que devem ser considerados todos os carregamentos dos estados limite último e estado último de serviço, dentre eles dos quais pode-se ressaltar os carregamentos devido a fadiga.

A fim de concluir sobre a viabilidade destes tipos de análise para projetos de fundações de aerogeradores, os resultados obtidos convergem visto a tensão corrigida obtida para ambos os métodos: rígido e MEF, porém os resultados obtidos divergem da tração máxima obtida nos chumbadores, com uma diferença de aproximadamente 30%. Desta forma se faz necessário o processamento em elementos

finitos para verificação das forças de tração dos chumbadores, justificando então a viabilidade de ambas as análises.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todas as pessoas que colaboraram com a elaboração do estudo, direta e indiretamente, o corpo técnico da empresa Apoio APF Assessoria e Projeto de Fundações S.S, em especial ao Eng. José Luiz de Paula Eduardo e também ao Eng. Fábio Ricci, pela colaboração e paciência ao longo da elaboração dos estudos e processamentos.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U.R. Exercícios de Fundações. 2ed. São Paulo: Blucher, 2010, 99 p.
- BOWLES, J.E. (1984) *Foundation Analysis and Design*, Third Edition, McGraw, p134, 1984.
- CHAMEKI S. (1954) *Consideração com rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Anais... Porto Alegre, RS, v.1.
- COLARES, G.M. (2006) *Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios*. Dissertação de mestrado da EESC da USP. São Carlos, SP.
- GONÇALVES, J.C. (2004) *Avaliação da Influência dos recalques das fundações na variação de cargas dos pilares de um edifício*. Dissertação de mestrado do PPGE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- GUSMÃO FILHO, J. A. (1994) Avaliação da influência da interação solo-estrutura. In: X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, PR, ABMS, Anais...v.1, p.68-74.
- GWEC (2015) *Global Wind Energy Report – Annual Market Update 2014*. Disponível em: <<http://www.gwec.net>>. Acesso em 09 julho de 2015.
- HOLANDA Jr, O.G. (1998) *Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas*. Dissertação de mestrado da EESC da USP. São Carlos, SP.
- JORDÃO D.R. (2003) *Estabilidade Global de Edifícios sobre Fundações Profundas, Considerando a ISE*. Dissertação de Mestrado da EESC / USP. São Carlos, SP.
- MELO, M. S. M. (2016) *Energia Eólica: aspectos técnicos e econômicos*. Dissertação de Mestrado, Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- RIBEIRO, B. D. (2009) *Estudo e aplicação de um elemento de contorno infinito na análise da interação solo-estrutura via combinação MEC/MEF*. Tese de doutorado da EESC / USP. São Carlos, SP, 214p.
- SCARLAT, A.S. (1993) *Effect of soil deformability on rigidity: related aspects of multistory buildings analysis*. ACI Struct. J., Detroit, v.90, n.2, 156-162p.
- SCHNAID F. et al. Ensaio de Campo e suas aplicações à engenharia de fundações. São Paulo. Oficina de Textos, 2012, 2ed. 223p.
- SOUZA, R.A.; REIS J.H.C. (2008) Interação Solo-Estrutura para Edifícios sobre Fundações Rasas. *Acta Sci. Technol.* v30, n.2, 161-171p.
- SVENSSON, H. (2010) *Design of Foundations for Wind Turbines*. Master's Dissertation, Lund University, Lund, Suécia.
- TERZAGHI, K. (1955) *Evaluation of coefficient of subgrade reaction*. *Geotechnique*, London, v.5, n.4, 297-326 p.
- VELLOSO, A D. et al. Fundações Volume 1, 2ed. UFRJ/COPPE, 1996, 180 p.
- WINKLER, E. (1867) *Die lehre von der Elastizität und Festigkeit*. Domicius.