DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA AUXILIAR PARA TRANSFERÊNCIA DE CARGAS EM FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES

VICTOR LEVI DE MELO OLIVEIRA[1]*; ITALO LINHARES SALMOÃO[2]

[1]Graduando em Engenharia Civil, UNIFOR, Fortaleza-CE, victor.levi.mo@edu.unifor.br;
[2]M.Sc. em Estruturas, Prof. Titular Universidade de Fortaleza - UNIFOR, Fortaleza-CE, italosalomao@unifor.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: A representação de elementos reais em modelos matemáticos necessita ser realizada de forma que seja gerado resultados próximos o suficiente da realizada, e com a uma quantidade baixa de esforço computacional. Este trabalho desenvolveu uma estrutura auxiliar de transferência de carga entre duas estruturas, sendo elas a torre de um aerogerador e sua base de sustentação (bloco e estaca), de forma a diminuir a influência das concentrações de tensões e distribuir os esforços de forma coerente. A metodologia adotada consistiu em gerar modelos numéricos computacionais baseados no Método dos Elementos Finitos, através do programa *Robot Structural Analysis*, e analisar as deformações. As modelagens garantiram o desenvolvimento de uma estrutura que, ao ser utilizada nas fundações, diminua em 65-88% das concentrações de tensões e aumentava consideravelmente o valor das tensões distribuídas ao longo do elemento estrutural. Esta estrutura consiste em uma placa rígida de módulo de elasticidade 250.000 MPa e 12 barras idênticas de módulo de elasticidade 200.000 MPa.
PALAVRAS-CHAVE: Fundações de aerogeradores, concentração de tensões, transferência de cargas.

DEVELOPMENT OF A AUXILIARY STRUCTURE TO WORK ON LOAD-TRANSFER FOR WIND TURBINE FOUNDATIONS

ABSTRACT: Representing a real system by mathematical models must create close enough results from reality with low use of computational effort. This work developed an auxiliary structure for load-transfer between a wind turbine tower and its support base (pile cap), in order to reduce the stress concentration influence and contribute to a consistent load distribution. The adopted methodology consisted of creating computational numerical models, based on FEM, through Robot Structural Analysis program to analyse the auxiliary structure's deformations. The developed structure, when modelled on the foundation, decreased by 65-88% the stress concentrations and considerably increased the stresses values distributed along the structural element. This structure is composed of a plate and 12 identical bars, with elasticity modulus of 250.000 MPa and 200.000 MPa, respectively.
KEYWORDS: Wind turbine foundation, stress concentration, load transfer.

INTRODUÇÃO

O uso de programas computacionais para dimensionar elementos estruturais é cada vez mais recorrente devido a sua precisão e simplicidade. O intuito dos modelos computacionais é simular as condições reais da estrutura, por isso, o engenheiro deve examinar alguns fatores, tanto na criação do modelo (valor da carga aplicada, ponto de carregamento, escolha do tipo de apoio a ser usado, etc.) quanto na análise (áreas solicitadas, deslocamentos, concentração de tensões, etc.). A influência dessas variáveis nos resultados obtidos é considerável, podendo levar o engenheiro a interpretações distantes da realidade.

No caso das fundações de aerogeradores, a simplificação dos esforços provenientes da torre e do vento podem ser considerados como cargas pontuais atuando no centro da fundação (Nicholson, 2011). Tal simplificação gera pontos de intensa concentração de tensão, influenciando o mecanismo de transferência de esforços entre os nós do elemento estrutural.

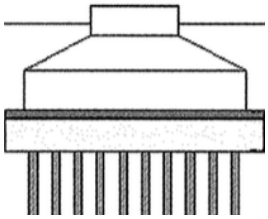
Estes efeitos são melhores compreendidos quando se analisa o corpo estrutural por meio de métodos numéricos, em especial o Método dos Elementos Finitos (Assan, 2003), o qual foi adotado no presente trabalho associado ao programa da Autodesk, *Robot Structural Analysis* (AUTODESK, 2010).

O objetivo do artigo foi analisar o uso de uma estrutura auxiliar em fundações de aerogeradores no tocante ao efeito de distribuição de cargas no elemento estrutural.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o caso estudado, foi adotada a fundação do tipo bloco e estacas, por ser umas das mais utilizadas no projeto de fundação de aerogeradores (Westgate & DeJong). Pascal et al. (2012) apresenta este tipo de estrutura na figura 1.

Figura 1 – Bloco e estacas (Fonte: Pascal et al., 2012)



A geometria do bloco da fundação está ilustrada na Figura 2, e suas dimensões apresentadas na Tabela 1, onde d é o menor diâmetro, D o maior diâmetro e H a altura. As características do concreto utilizado podem ser encontrados na Tabela 2.

Figura 2 – Geometria do Bloco de concreto (Fonte: Autor)

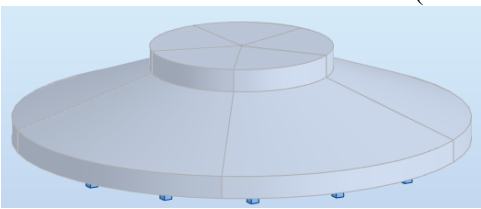


Tabela 1 – Valores geométricos do Bloco de Concreto

d(m)	D(m)	H(m)
8,00	20,00	4,20

Tabela 2 – Característica do Concreto

f_{ck}	γ	E_{cs}	G	ν
30M MPa	25 kN/m^3	26.072 MPa	10.430 MPa	0,2

Como condições de apoio, foram utilizados 15 apoios do terceiro gênero igualmente distribuídos na periferia da fundação, representando as estacas do bloco.

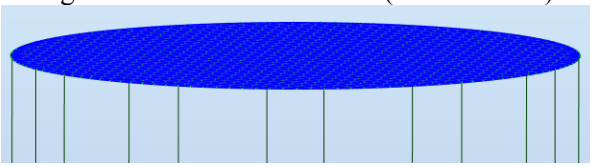
A Tabela 3 indica os carregamentos adotados.

Tabela 3 – Carregamentos provenientes da Torre

Força Horizontal	Força Vertical	Momento
500 kN	2670 kN	80.000 kN.m

De posse dos parâmetros necessários para as modelagens, o estudo desenvolveu uma estrutura auxiliar que, quando carregada com os esforços solicitantes, transferisse integralmente os mesmos para a fundação. A estrutura auxiliar é ilustrada na figura 3.

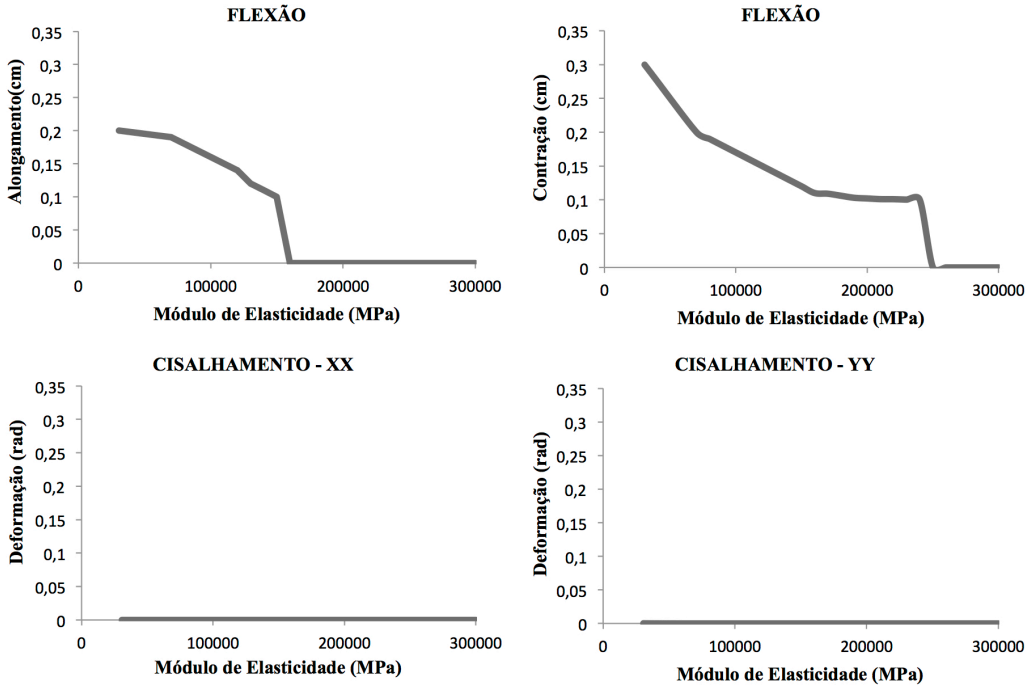
Figura 3 – Estrutura Auxiliar (Fonte: Autor)



Para garantir que a estrutura auxiliar cumprisse sua função sem comprometer os resultados, duas premissas devem ser obedecidas: não pode haver deformação nem acréscimo de tensões na fundação. A segunda premissa foi realizada através da criação de um material a ser utilizado na placa e nas barras cujo valor do peso específico é desprezível, evitando assim influência do peso próprio. Já o comportamento rígido da estrutura auxiliar se deu através de simulações na placa e nas barras, onde variou-se o módulo de elasticidade do material utilizado em função da deformação, até encontrar um valor no qual esta fosse nula.

Para a placa, adotou-se um diâmetro de 7 metros e três casos foram analisado, segundo a espessura da mesma: 20 cm, 60 cm e 100 cm. As simulações consistiram em aplicar os carregamentos no centro da placa. Foram considerados 12 apoios do terceiro gênero igualmente espaçados na periferia da placa. Os valores do módulo de elasticidade variaram de 30.673 MPa a 300.000 MPa, e para cada valor, foram analisadas as deformações devido a flexão e ao cisalhamento. Para a espessura de 20 cm e 60 cm a placa apresentou deslocamentos consideráveis para todos os valores do módulo de elasticidade. Já para a espessura de 100 cm os gráficos da deformação pelo módulo de elasticidade são apresentados na figura 4.

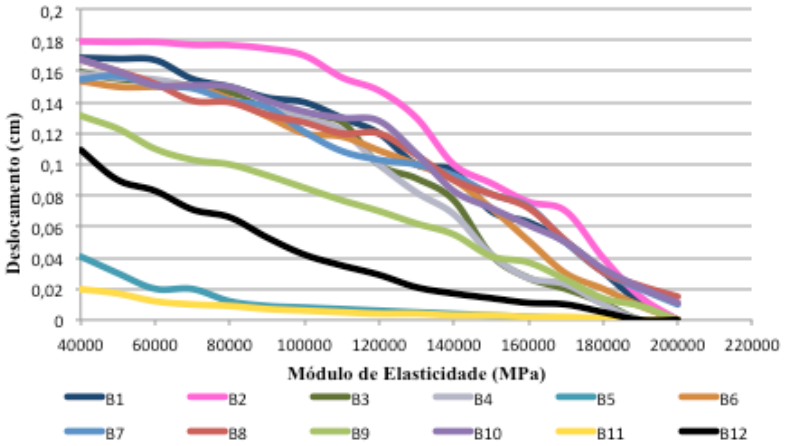
Figura 4 – Gráfico Deformação x Módulo de elasticidade (Fonte: Autor)



Ao atingir o valor de 250000 MPa, a placa com 100 cm de espessura apresentou deformação nula devido a flexão e ao cisalhamento e, portanto, este foi o valor adotado para o módulo de elasticidade da placa da estrutura auxiliar.

A próxima etapa do estudo foi encontrar um valor para o módulo de elasticidade para as barras, tal que o efeito de flambagem fosse nulo. A análise consistiu de maneira similar ao processo determinístico adotado para a verificação das placas: variou-se o módulo de elasticidade de 40.000 MPa até 200.000 MPa e, para cada valor deste, verificou-se a flambagem. Para a simulação, as 12 barras tiveram uma extremidade conectada a placa de 100 cm de espessura e a outra extremidade em uma segunda placa completamente engastada em sua face. Esta última simula a fundação e possui as mesmas características apresentadas na tabela 2. A placa rígida foi carregada com os esforços aplicados em seu centro e verificou-se o efeito de flambagem em cada barra. A barra adotada nos modelos foi de seção circular com 30 cm de diâmetro. O gráfico 1 apresenta os resultados para cada uma das barras.

Gráfico 1 – Flambagem x Módulo de Elasticidade



As barras B5, B8 e B10 não apresentaram valor nulo para o deslocamento quando o módulo de elasticidade era de 200.000 MPa, mas como estes eram da ordem de 0,02 cm, o estudo considerou o efeito de flambagem desprezível e adotou o referido valor para as barras.

Foi analisado, então, a influência da estrutura auxiliar na distribuição de tensões. Dois modelos foram comparados. A Tabela 4 explica os detalhes dos mesmos.

Tabela 4 – Modelos de fundação

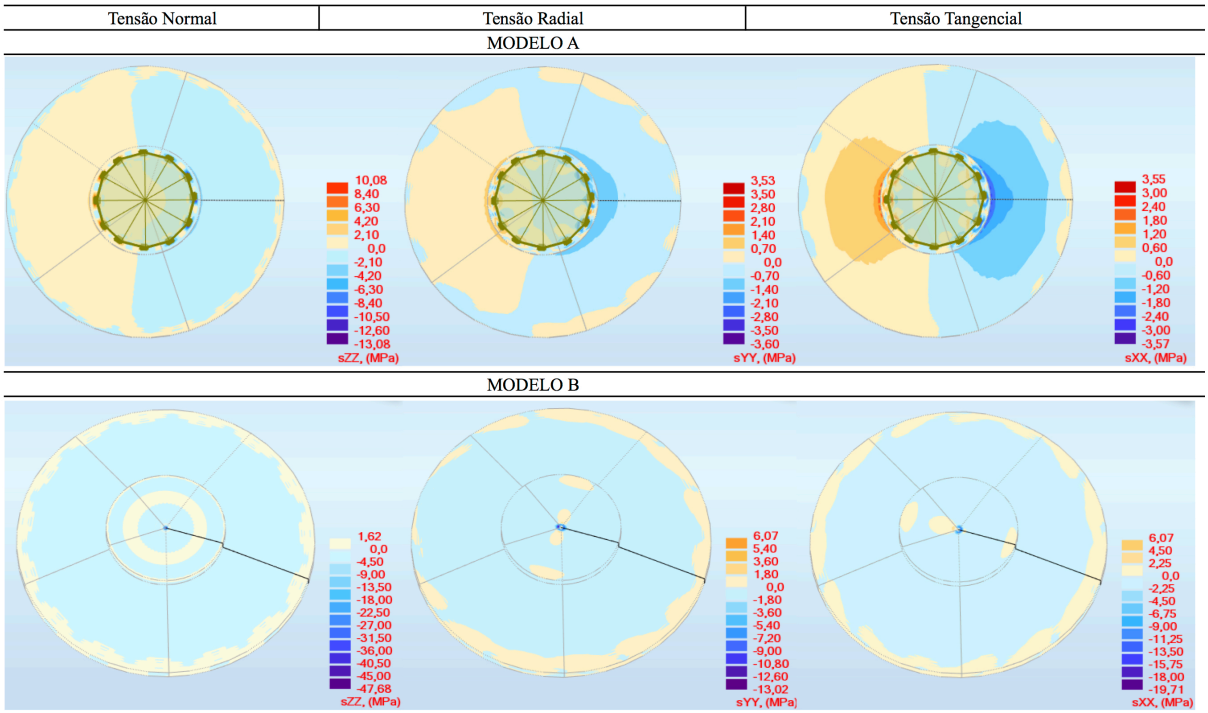
Modelo A	Fundação sem uso da estrutura auxiliar
Modelo B	Fundação com a estrutura auxiliar

No modelo A o carregamento foi aplicado no centro da estrutura auxiliar enquanto que no modelo B a aplicação foi feita diretamente no centro da fundação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 5 apresenta os mapas de tensões normais, radiais e tangencias para os modelos A e B, respectivamente.

Figura 5 – Mapa de Tensões (Fonte: Autor)



Além dos mapas, foram verificadas o valor de concentrações nos dois modelos. No modelo A as concentrações de tensões se localizaram próximas as barras enquanto que no modelo B a região mais solicitada foi próxima a aplicação da carga. A Tabela 5 apresenta os valores máximos de concentração de tensões nos modelos A e B.

Tabela 5 – Análise da Concentração de Tensão

	MODELO A	MODELO B
Máxima Tensão Normal Média (MPa)	-7,12	-20,43
MáximaTensão Radial Média (MPa)	-1,68	-11,32
Máxima Tensão Tangencial Média (MPa)	-2,28	-19,24

Também foi escolhido um nó a um metro do centro da fundação e observou-se os valores de tensão atuantes no mesmo. A tabela 6 indica os valores.

Tabela 6 – Tensões nodais

	MODELO A	MODELO B
Tensão Normal Nodal (MPa)	-3,07	-0,69
Tensão Radial Nodal (MPa)	-0,88	-0,12
Tensão Tangencial Nodal (MPa)	-1,84	-0,20

CONCLUSÃO

O uso da estrutura auxiliar se mostrou eficaz na redução das concentrações de tensões, gerando uma diminuição de, aproximadamente, 65% para tensões normais, 85% para tensões radiais e 88% para tensões tangenciais. Já quanto a distribuição de esforços no corpo do bloco, observou-se que para um nó qualquer distante um metro do centro da fundação houve, na fundação com a estrutura auxiliar, um aumento na tensão atuante de, aproximadamente, 345% para tensões normais, 633% para tensões radiais e 820% para tensões tangenciais. O efeito dessas consideráveis diferenças podem ser vistos nos mapas de tensões, onde o modelo A distribui de forma mais homogênea os carregamento, enquanto que os esforços presentes no modelo B se concentram apenas em uma região.

Conclui-se, então, que a estrutura auxiliar desenvolvida deve ser usada garantir a transferência de cargas em fundações de aerogeradores, uma vez que seu uso apresentou uma melhoria significativa na distribuição de tensões ao longo do corpo da fundação e na dissipação dos efeitos das concentrações de tensões.

REFERÊNCIAS

AUTODESK. Metric Getting Started Guide. EUA, 2010. 181 p.

Assan, A.E. Método dos elementos finitos: primeiros passos. 2. ed. UNICAMP, 2003. 304 p.

Nicholson, J.C. Design of Wind Turbine tower and foundation systems: optimization approach. University of Iowa, 2011. Dissertação (Masters of Structural Engineering).

Pascal, A. et al. Recommendations for the design, calculation, installation and inspection of Wind-turbine foundations. Revue Française de Geótechnique, n. 138-139, p. 51-97, 2012.

Westgate, Z.J.; DeJong, J.T. Geotechnical considerations for offshore Wind turbines. In: Report for MTC OTC Project, 2005, Massachusetts.