

Fundações de Aerogeradores - Desafios de Projeto e Execução

Prof. Jarbas Milititsky

Diretor, Milititsky Consultoria Geotécnica - Engenheiros Associados S/S, Porto Alegre, Brasil,
milititsky@milititsky.com.br

RESUMO: O crescente uso de energia eólica na Brasil fez com que os profissionais de engenharia de fundações tivessem que enfrentar um problema com características de natureza diversa daquela com a qual já atingiram maturidade e excelência. Especificações de fornecedores de equipamento estrangeiros, com práticas e exigências diversas causaram contenciosos que podem ser evitados pelo conhecimento das características, exigências e reais necessidades destes projetos. Com a finalidade de transmitir nossa experiência na solução de projetos nesta área o presente trabalho é uma contribuição de natureza prática para que haja melhor entendimento das características especiais e necessidade técnicas e operacionais na engenharia de fundações destas estruturas. São abordados os seguintes itens: escolha do tipo de fundação – fatores de escolha, a ordem de grandeza das cargas, as soluções típicas de fundações ,a investigação do subsolo, o projeto de fundações e casos de projetos reais de nossa autoria para diferentes condições de subsolo.

PALAVRAS-CHAVE: fundações superficiais, fundações profundas, aerogeradores, projeto, controle executivo, desafios.

ABSTRACT: The increasing use of wind energy in Brazil has made foundation engineering professionals have to face a problem with characteristics of a nature different from that with which they have already reached maturity and excellence. Specifications of foreign equipment suppliers with diverse practices and requirements have caused litigation that can be avoided by knowledge of the characteristics, requirements and actual needs of these projects. With the purpose of transmitting our experience in the solution of projects in this area the present work is a contribution of a practical nature to provide a better understanding of the special characteristics and technical and operational necessities in the engineering of foundations of these structures. The following items are addressed: factors affecting choice of foundation type, order of magnitude of loads, typical foundations solutions, subsoil investigation, foundations design and actual project cases by us for different subsoil conditions.

KEYWORDS: shallow foundations, deep foundations, wind turbines, design, construction control, challenges.

1 Introdução

São apresentados os aspectos característicos da solução de fundações de aerogeradores, incluindo as etapas de investigação do subsolo, escolha de soluções, projeto, supervisão de execução e liberação das fundações executadas, com apresentação de casos de obras com diferentes opções construtivas de solução. Além do conhecimento fundamental de comportamento do solo quando são transmitidas cargas através de fundações diretas ou profundas, típicas de todas as soluções de fundações de estruturas, são abordados aspectos da prática e experiência necessários para a boa condução do problema associados às necessidades dos projetos dos parques de aerogeração, diferentes especificações dos fornecedores e práticas vigentes nos locais de origem dos mesmos.

2 Características diferentes dos outros problemas de fundação - Comparação com outras estruturas similares

Quando são feitas comparações entre torres para turbinas eólicas e estruturas similares para as quais fundações devem ser projetadas, verifica-se que a natureza do problema é diferente, seja pela responsabilidade, seja pelo nível elevado de carregamento, seja pelas necessidades especiais de desempenho, seja pelas condições dos locais onde as mesmas são implantadas.

Torres de Telecomunicação:

- 60 a 120 m de altura
- Sem carregamento repetido
- Elementos únicos (isolados)
- Sem cargas decorrentes da operação e funcionamento
- Sem limites de rigidez das fundações

Torres de linhas de transmissão elétrica:

- Baixa carga atuante
- Grande número, em geral solução padrão
- Construções em locais onde não há experiência anterior na solução de fundações
- Colapso sem risco elevado, projeto para cargas com determinado período de recorrência
- Sem requisitos de desempenho – somente condição de segurança à ruptura, nenhuma consideração referente à rigidez

Aerogeradores:

- Alturas entre 75 e 120 m, com pás de 35 a 70 m
- Grande número – 30/140 em cada parque
- Vida útil de 20 anos (175.000 horas de operação) com cargas repetidas provenientes da operação (fadiga)
- Construções em locais onde não há experiência anterior na solução de fundações
- Cargas muito elevadas (escala)
- Especificações dos fornecedores com diferentes características (solução e desempenho)
- Requisitos de rigidez das fundações importantes para o dimensionamento estrutural do bloco e torre

3 Ocorrência de Acidentes

Acidentes com estruturas de aerogeradores são em geral espetaculares, como mostram as figuras a seguir apresentadas.



Figura 1. Acidentes com aerogeradores.

A estatística de acidentes em geral, incluídos os estruturais e outras pode ser vista na Figura 2.

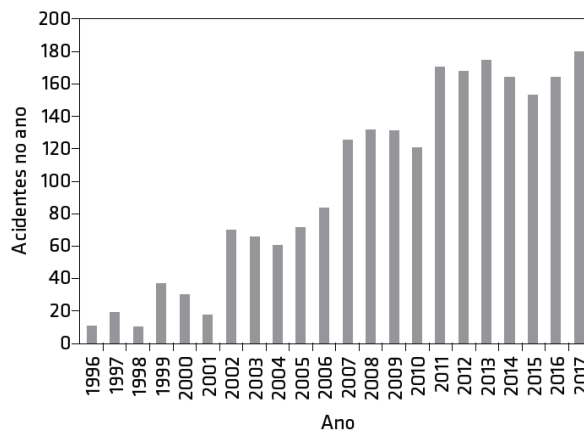


Figura 2. Estatística de acidentes com aerogeradores.

É relativamente comum a verificação de desempenho não satisfatório devido à falta de rigidez das fundações e fadiga na junção entre torres metálicas e a base das torres.

A localização dos aerogeradores tem decisão definida pela capacidade de geração e direção de ventos dominantes, não é de natureza geotécnica. Em muitas situações as bases das turbinas se localizam em antigas lavouras de arroz ou camaroneiras, com a presença de materiais de baixa resistência, ou regiões de difícil acesso, dificultando desde a investigação do subsolo até a implantação das estruturas.

4 Investigação do Subsolo

Da mesma forma como em outras situações de elaboração de solução de fundações, o conhecimento das condições do subsolo onde serão implantados os aerogeradores é elemento fundamental para a obtenção de sucesso, técnico e econômico.

Apresentaremos para comparação de procedimentos as indicações existentes nas diferentes práticas e recomendações, uma vez que em muitas situações os fabricantes das turbinas se defrontam com situações conflitantes face às diferenças ente a prática brasileira e aquelas nas quais estão acostumados usuais em seus países de origem ou regiões de atuação. Além das características de ocorrência dos perfis de subsolo é

sempre enfatizada a necessidade de identificação do nível do lençol freático e sua variação sazonal, pela importância de sua atuação na estabilidade das fundações.

4.1. Indicações gerais existentes nas diferentes práticas

- Experiência francesa: as recomendações do documento “CFMS. Recommendations sur la conception, le calcul, l’exécution et le contrôle des fondations d’éoliennes (2010), indica duas etapas como a seguir referido: a) Preliminar: 1 sondagem geotécnica para cada grupo de 6 bases, complementada por sondagem geofísica; b) Definitiva: 1 sondagem no centro de cada base, complementada por 2 ou 3 nos extremos da base para estudar a heterogeneidade.

- Experiência norueguesa (Veritas): as recomendações do Bureau Veritas – “Guidelines for Design of Wind Turbines – DNV/RisØ” indicam campanhas completas de investigação, incluindo aí o uso de levantamentos Geológicos, uso de procedimentos Geofísicos e Geotécnicos, etapas com ensaios de campo (uso de CPT compulsório) e laboratório (ensaios cíclicos para o projeto de fundações diretas)

- Experiência americana: de acordo com o documento “Recommended Practice for Compliance of Large Onshore Wind Turbine Support Structures, AWEA/ASCE, 2011” podem ser ensaios de SPT, Cone (CPT), dilatômetro (DMT) e ensaios de laboratório para caracterização de comportamento. Indica os ensaios geofísicos como complementares.

- Prática do Brasil: a experiência de caracterização do comportamento do subsolo para solução de fundações para o caso de parques de aerogeradores é a mesma utilizada para fundações correntes. Usualmente é limitada a 1 ou 2 sondagens de simples reconhecimento (SPT) por base, eventualmente sondagens mistas em solo e rocha quando da ocorrência de maciços rochosos a pequena profundidade e em raros casos ocorre a realização de ensaios especiais quando da necessidade de obtenção de módulos para dimensionamento de fundações superficiais ou caracterização de possível colapsibilidade ou expansibilidade dos materiais.

4.2. Profundidade de investigação

- Prática da França:

- a) Para soluções em fundações diretas $D \geq 1,5 \text{ Ø}$ da base (tipicamente Ø da base $> 18 \text{ m}$)
- b) Para soluções em estacas = 5 m abaixo da ponta das estacas ou 7 Ø das estacas (normalmente não se conhece a solução de fundações nesta etapa, sendo portanto difícil a implementação desta recomendação)

- Prática da Noruega:

- a) Para fundações diretas: $D \geq 1,0 \text{ Ø}$ da base
- b) Estacas = 20 a 30 m (com ensaios de CPT sempre)

- Prática dos Estados Unidos:

- a) Para fundações diretas: $D \geq 1,0 \text{ Ø}$ da base
- b) Estacas = 20% a mais do comprimento projetado das estacas

- Prática no Brasil

Tipicamente sondagens de simples reconhecimento são usadas (SPT) $L > 35 \text{ m}$ em solos de baixa resistência, mínimo 15 m em materiais de alta resistência em sondagens mistas em solo e rocha (alteração de basalto, rochas brandas típicas do nordeste...), em raros casos é usada a geofísica

para definição de presença de topo rochoso e ou sísmica para definição de módulos nos casos de projetos de fundações diretas.

4.3. Desafios

Os desafios envolvendo a investigação geotécnica para projetos de aerogeradores são apresentados a seguir.

- Elaboração de programa de investigação que caracterize as condições do subsolo de forma a permitir não só a escolha de sistema de fundações como seu dimensionamento;
- Garantia de real representatividade dos dados obtidos no programa de investigação, muitas vezes realizado antes da participação do projetista de fundações em locais de difícil acesso e com serviços muitas vezes não fiscalizados ou supervisionados;
- Caracterização das eventuais situações especiais de colapsibilidade ou expansibilidade dos materiais do subsolo, ou presença de materiais cársticos;
- Identificação da presença do lençol freático e da possibilidade de sua variação ao longo da vida útil do projeto pela importância da consideração da real contribuição do peso próprio do bloco na estabilidade e carregamento das fundações.

5 Cargas

As cargas atuantes na base das torres que suportam as turbinas são decorrentes de solicitações de origem diferenciada (vento, ações do rotor e pás, excentricidades, peso próprio, ações sísmicas e considerações de fadiga) e extremamente elevadas, com momentos instabilizadores muitas vezes acima das 10.000 ton.m. Nos casos em que as torres projetadas são metálicas, as cargas verticais significativas são as decorrentes do peso do bloco. Atenção especial merece a questão da possibilidade que o mesmo esteja submerso, alterando completamente a distribuição e natureza das cargas nas fundações, bem como sua estabilidade nos casos de fundações diretas.

A tabela abaixo mostra, para diferentes combinações de hipóteses de atuação dos esforços atuantes, os carregamentos a considerar em base de torre com 120 m de altura.

Load	case	Mx (kN·m)	My (kN·m)	Mxy (kN·m)	Mz (kN·m)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fxy (kN)	Fz (kN)	
Mx	Max	6.1j	141954	46698	149437	4836.5	745	-1509.3	1683.1	-17154
Mx	Min	6.1a	-142582	49810	151031	-3335.8	826.3	1510.3	1721.6	-17270
My	Max	1.5v3	1866.6	133464	133477	-2211.6	1377.1	33.1	1377.5	-17378
My	Min	1.5v2	-25141	-137200	139485	-6406.5	-1135.5	300.1	1174.5	-17251
Mxy	Max	6.1a	-142011	51415	151031	-3396.5	852.2	1514.7	1738	-17282
Mxy	Min	8.1ea1	-3.9	-7.95	8.86	401.8	74	6.98	74.3	-19324
Mz	Max	1.5x2	-8994.3	179.2	8996.1	8186.1	195.3	129.2	234.2	-17307
Mz	Min	2.2e	-15284	-51541	53760	-10211	-421.7	158.3	450.5	-14081
Fx	Max	6.1j	81880	108441	135882	3086.2	1427.1	-878.4	1675.7	-17231
Fx	Min	1.5v2	-26106	-136469	138943	-6286.6	-1139.2	326.1	1184.9	-17249
Fy	Max	6.1f	-141637	30134	144808	-3998.7	596.7	1588.4	1696.7	-17317
Fy	Min	6.1j	141943	48929	150140	4875.6	776	-1513.6	1700.9	-17143
Fxy	Max	6.1g	-130988	66743	147011	-3114.9	1032.6	1411.3	1748.8	-17135
Fxy	Min	1.5e1	-219.7	-9111	9113.7	245.9	-0.92	0.34	0.98	-17378
Fz	Max	7.1s31	22385	32298	39297	-602.5	465.4	-306.2	557.1	-13878
Fz	Min	8.1ua7	-397.8	-33989	33992	-37.9	-368.3	3.76	368.3	-19394

Table 2: Extreme Load Cases.

Figura 3. Exemplo de cargas atuantes nos aerogeradores.

Para torre com 130 m de altura a configuração simplificada do carregamento, para dar uma ordem de grandeza dos mesmos é o abaixo indicado:

AXIAL (Fz)	1440.00	tf	tf
MOMENTO (Mxy)	17200.00	tf.m	tf.m
TORÇÃO (Mz)	94.50	tf.m	tf.m
CORTANTE (Fxy)	129.00	tf	tf
CORTANTE EQUIVALENTE (Fxy')	129.00	tf	
MOM. BASE DO BLOCO	17561.20	tf.m	tf.m

Figura 4. Exemplo de cargas atuantes nos aerogeradores com 130 m de altura

As cargas atuantes nas fundações devem ser avaliadas nas condições de ELS (estado limite de serviço), onde alguns fornecedores não admitem nem tração nas estacas nem regiões não comprimidas no caso de solução em fundações diretas, ELU (estado limite último) e cargas limites de fadiga (para a estrutura do bloco).

Cada fornecedor de equipamento tem indicações específicas referentes à determinação de combinações de carregamento para a obtenção das solicitações ao nível da base do aerogerador, incluindo questões referentes à fadiga e cargas extremas. Nestas considerações ficam incluídas, por exemplo, área mínima de contato de fundações diretas quando da atuação de solicitações do ELS, ELU e fadiga. Nas condições de ELS (estado limite de serviço), alguns fornecedores não admitem nem tração nas estacas nem regiões não comprimidas no caso de solução em fundações diretas:

6 Tipos de fundação e verificações em projeto

Os fatores que afetam a escolha do tipo de fundação a ser utilizado, em geral, são os seguintes:

- Localização e tipo de torre
- Magnitude das cargas
- Condições do subsolo
- Acesso para equipamento
- Custos relativos
- Práticas construtivas locais e disponibilidade de materiais
- Requisitos específicos de órgãos e ou fornecedores de equipamentos/proprietários dos serviços
- Durabilidade dos materiais
- Sustentabilidade;

Passaremos a comentar brevemente cada um destes aspectos para posteriormente apresentar as soluções disponíveis e ou usadas na prática brasileira.

Localização e tipo de torre: Torres tem variabilidade de estrutura, desde aquelas constituídas por elemento de concreto ou metálicas. A questão da localização é importante, especialmente quando a solução adequada é do tipo fundações profundas, com a necessidade de disponibilidade de equipamento e insumos para a confecção das estacas e acesso dos mesmos ao local da obra. Um aspecto a ser considerado quanto à influência da localização das mesmas é a questão de dificuldade de disponibilidade dos materiais necessários à sua execução.

Magnitude das cargas: A magnitude das cargas depende não somente do tipo de torre, de turbina, de altura da mesma e do regime de ventos da região, resultando em variedade de cargas atuantes.

Condições do subsolo: Como em qualquer fundação, as condições do subsolo são preponderantes na escolha das soluções de fundações, cabendo sempre a verificação da

possibilidade de execução de fundações diretas, pela facilidade e custos em geral reduzidos. A ocorrência das camadas resistentes em determinada profundidade vai direcionar a opção de fundação mais adequada. A presença de solos problemáticos superficiais (expansivos ou colapsíveis) ou profundos (cársticos) certamente condicionam as soluções a serem consideradas e adotadas.

Acesso para equipamento: Em certas circunstâncias a questão de acesso de equipamento acaba limitando a escolha do tipo de solução, como quando ocorrem solos muito moles superficiais e os acessos ainda não estão implantados, por exemplo.

Custos relativos: Muitas vezes existem soluções alternativas tecnicamente cabíveis de fundações. A comparação entre as opções deve ser feita, considerando não somente o custo direto das soluções, mas também prazos construtivos e custos associados.

Práticas construtivas locais e disponibilidade de materiais: As práticas construtivas locais são importantes pela experiência dos executantes em solos regionais, bem como pela disponibilidade de equipamentos no mercado. Questão importante é a disponibilidade de materiais, mas também nos casos de elementos industrializados (estacas pré-moldadas, perfis metálicos) que necessitem transporte em longa distância influenciando no custo.

Requisitos de desempenho das torres: Aerogeradores tem seu desempenho sob carga quanto à rigidez como possível limitador de soluções ou condicionador de soluções mais rígidas, além da necessidade de atendimento de segurança a esforços de tração e horizontais.

Especificações de órgãos e ou fornecedores de equipamentos/proprietários dos serviços, uso de soluções certificadas: A variabilidade de situações nas quais se fazem projetos de fundações de aerogeradores, considerando os contratantes das mais diversas naturezas, resulta muitas vezes na necessidade de utilização de requisitos e ou sistemas pré-estabelecidos, pela necessidade de uso de soluções certificadas ou aprovadas por entidades reguladoras ou seguradoras. Existem desde situações com soluções padronizadas e ou certificadas a serem detalhadas e verificadas/dimensionadas, determinação de obrigatoriedade de uso de estacas inclinadas para fundações profundas até veto à utilização de certos sistemas construtivos de fundações. É sempre importante a consulta às especificações e recomendações existentes em cada caso, antes da elaboração de análise e detalhamento das soluções.

Durabilidade dos materiais: A questão da vida útil das fundações leva em consideração a agressividade do meio e o tempo de utilização da estrutura sendo projetada entre as condições de projeto e especificações dos materiais. Características de consumo mínimo de cimento, valores de F_{ck} , recobrimento de armaduras, proteção de soldas e elementos metálicos são aspectos recorrentes quanto à questão de durabilidade das soluções e devem ser adequadamente especificados em cada projeto.

Sustentabilidade: A consideração do item sustentabilidade é nova na área de fundações, mas tende a ser cada vez mais presente nas especificações, requisitos ambientais e normalização. A geração de pegadas de carbono (toneladas de geração de CO₂) a ser considerada inclui desde a construção do equipamento executor da fundação e sua vida útil, transporte do mesmo para o local da obra, execução das fundações, geração de carbono na produção dos materiais das fundações.

Dentre as soluções mais frequentes de fundações de aerogeradores podem ser referidas as seguintes:

Diretas: Radier em placa única. Como em grande maioria de soluções de fundação, esta é sempre a primeira a ser cogitada, não somente por sua economia, mas também pela possibilidade de inspeção e liberação do material sobre o qual estarão sendo aplicadas as cargas e execução sem equipamentos especiais ou fornecedor especializado (tipicamente da ordem de 18 a 25 metros de diâmetro, dependendo das cargas e características do subsolo).

Estaqueadas: blocos de fundação com estacas verticais ou inclinadas. Nos casos frequentes em que não ocorre horizonte com adequado comportamento em profundidade conveniente, ou a implantação do parque prevê aterros na posição das torres, são projetadas fundações em estacas. As mesmas poderão ser verticais ou inclinadas, dependendo da natureza das camadas e requisitos de desempenho da base. Alguns fabricantes de turbinas tem determinação explícita referente ao uso de estacas inclinadas compulsoriamente para limitar deslocamentos. Bases tipicamente com 16 a 24 metros de diâmetro suportadas por número de estacas variável entre 16 e 48 unidades, dependendo das cargas atuantes.

Especiais: identificadas como aquelas que não se enquadram nas acima referidas.

No Brasil: fundações diretas com ancoragem (tirantes) para suportar tração

Na Europa: bases em fundações diretas sobre solo tratado ou colunas de brita (ampla referência a esta solução na publicação “CFMS. Recommendations sur la conception, le calcul, l’exécution et le contrôle des fondations d’éoliennes (2010)”. Estas soluções começam a ser utilizadas no Brasil.

6.1 Escolha do tipo (alternativas)

A opção ideal é aquela em que todas as fundações de um parque são idênticas, resultando em facilidade construtiva e de sequencia das operações. A opção de solução deve atender à segurança, custos e velocidade construtiva, além de requisitos específicos característicos da área profissional, a saber:

Os diferentes fornecedores de equipamento têm diferentes requisitos e práticas (GE, Wobben, Gamesa, Enercon, IMPSA) referentes a soluções aceitáveis ou certificadas (ver referências).

Características como velocidade de execução, confiabilidade da solução, custos reduzidos, certificação e rastreabilidade do sistema são itens fundamentais na escolha.

Quando possível, no caso de fundações em estacas, usa-se bloco de mesma geometria com fundações profundas com diferentes profundidades e número, função da presença das camadas resistentes nos perfis de subsolo.

As formas de bloco são metálicas, com mesma geometria, reaproveitáveis, típicas de situações com repetição de solução.

Extremamente importante a previsão de execução sequencial para facilitar montagem do sistema estacas, bloco, torre, turbinas.

É oportuno referir que os contratos entre os diversos participantes do projeto (proprietário, construtora, fornecedor de equipamentos, governo) têm condições com muitas elevadas relativas a prazos de entrega das torres (base e torre propriamente dita) e fornecimento dos equipamentos, além do início de geração de energia pelo parque. Esta condição impacta na escolha de solução e sua eficiência garantida, pelas implicações contratuais inerentes a necessidades de reforços ou garantia de segurança.

6.2 Fundações Diretas (verificações)

Nos projetos de base em Radier (diretas), as verificações que devem ser feitas se referem aos seguintes aspectos:

- Segurança à ruptura (tensões admissíveis), em geral não é o aspecto preponderante (recomendação de $FS > 3$);
- Segurança ao tombamento, em geral resultando em bases de dimensões avantajadas (recomendações de $FS > 1,5$);
- Segurança ao deslizamento;

- Recalques compatíveis, necessitando informações da compressibilidade do solo, com verificações referentes sobre efeitos no comportamento geral da base e torre sob operação;
- Efeitos do carregamento repetido (degradação do solo sob carregamento cíclico)- item com baixíssimo conhecimento na prática de fundações do Brasil, necessitando ensaios não usuais em nossa prática (motivo possível da adoção de solução em Radier somente nos casos de ocorrência de materiais rochosos, caso de rochas brandas e outras mais resistentes em pequena profundidade);
- Segurança à erosão;
- Efeito da ação da água (subpressão) no peso do bloco a ser considerado no projeto.

Para a avaliação dos efeitos das Cargas repetidas x fadiga x deslocamentos é necessária a determinação (não a estimativa obtida por correlação) do módulo elástico do solo, cujo valor é variável em função do nível de deformação (caso do problema em estudo) e da forma de determinação, como mostrado de forma esquemática na Figura 5 abaixo.

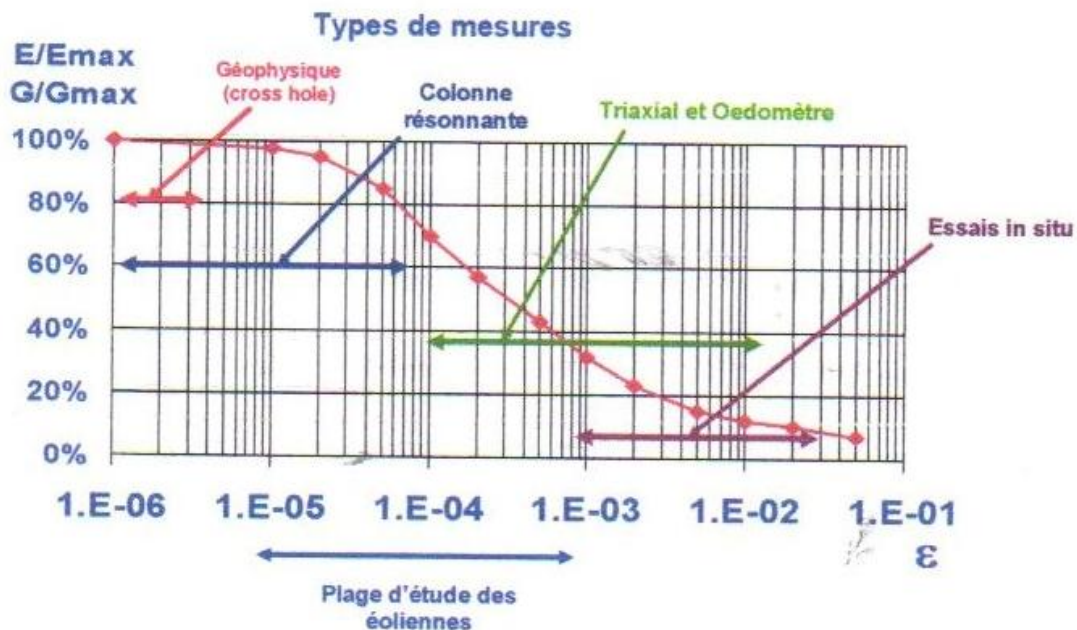


Figura 5. Níveis de deformação e diferentes formas de obtenção de módulos

Para o carregamento excêntrico (ação dos momentos elevados) são utilizadas as áreas equivalentes, como mostrado na Figura 6 abaixo.

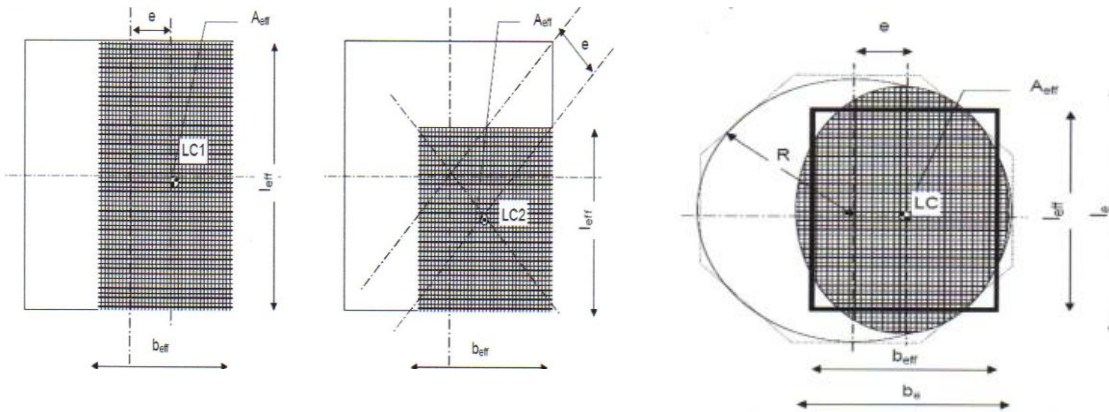


Figura 6. Áreas equivalentes para os casos de excentricidade de carregamento

No caso de utilização de ensaio de placa para a determinação do coeficiente de recalque para dimensionamento de fundações diretas, é necessário levar em conta a questão de escala entre o ensaio e a fundação real.

É importante referir que ocorrem regiões sísmicas no Brasil como indicado na Figura 7, com normalização específica (NORMA NBR 15421/2006 de Projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento)

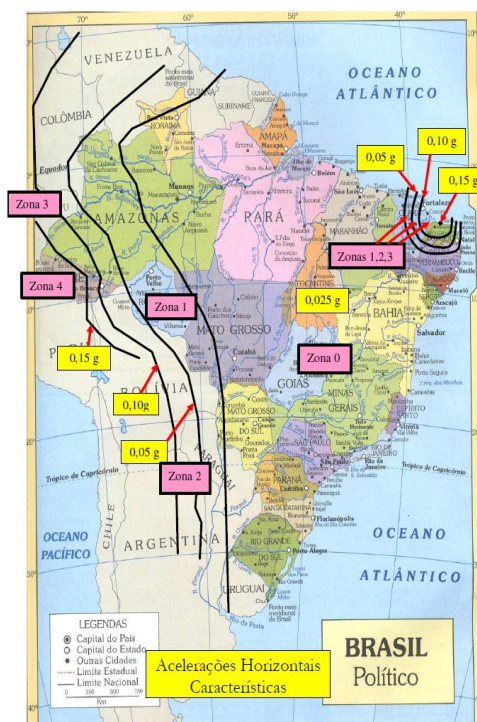


Figura 7. Regiões sísmicas do Brasil

6.3 Fundações em Estacas (verificações)

Depois de realizada a escolha da opção de fundação profunda (tipo de estaca), em função do nível de carregamento, características dos perfis típicos do subsolo e sua compatibilidade e exequibilidade construtiva, custos, equipamentos disponíveis, prazos necessários, os carregamentos

em compressão, tração e horizontal devem ser objeto de análise. Além destes aspectos, a rigidez das estacas deve ser fornecida ao projetista estrutural para que seja feita a avaliação dos deslocamentos da solução (efeitos da rigidez das estacas, bloco e torre nos deslocamentos do conjunto).

São feitas as verificações em Tração e Compressão nas estacas no caso ELU, com todos fornecedores exigindo a condição sem tração nas estacas no caso ELS.

A recomendação francesa: todas as cargas (horizontais especialmente) nas estacas, sem a contribuição do empuxo passivo no bloco e atrito da base.

Alguns fabricantes de equipamento têm padrões básicos de solução (tamanho de bloco, nº de estacas, geometria, obrigatoriedade de utilização de estacas inclinadas) ou soluções certificadas, além de imposição de cumprir especificações como:

- Posição de solda (distância mínima) em estacas metálicas ou pré-moldadas em relação à base do bloco;
- Vinculação de estacas no bloco (metálicas);
- Veto a tipos de estacas (hélice contínua monitorada, por exemplo).

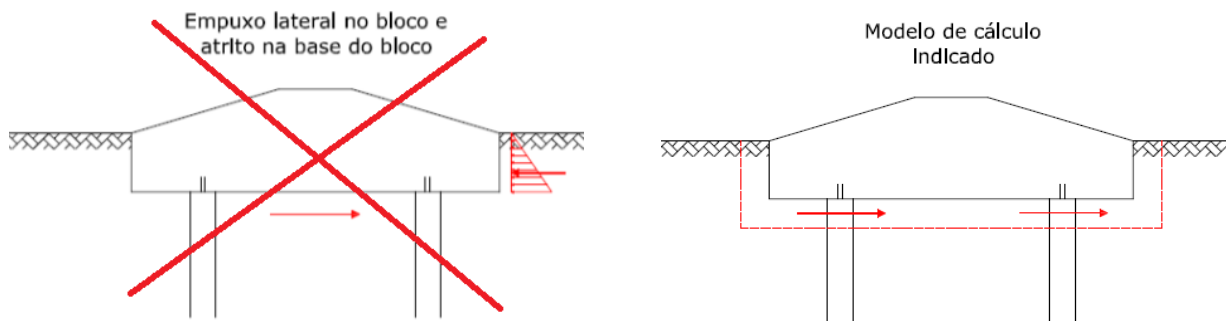


Figura 8. Recomendação francesa quanto à resistência a carregamentos horizontais

Compressão

A capacidade de carga à compressão das fundações por estacas é tema recorrente da engenharia de fundações. Para estacas em solos com vários tipos de material com várias camadas a resistência lateral é o somatório das resistências em cada camada atravessada pela estaca.

Os diversos métodos de cálculo para estacas em solo podem ser agrupados de acordo com a forma de obtenção de valores unitários de resistência na forma: A) correlações com N_{spt} , B) correlações com CPT; C) métodos analíticos de condição drenada (tensões totais) e considerando tensões efetivas. Para estacas em rocha (estacas raiz e Hélice Contínua Especial, por exemplo) geralmente o cálculo é realizado relacionando a resistência à compressão simples do maciço rochoso e o RQD com valores de resistência unitária.

Como em qualquer tipo de estaca, devem ser feitas verificações de resistência estrutural e geotécnica, adotando-se sempre, com os devidos fatores de segurança da normalização, o menor deles.

A extrapolação de correlações de valores de N_{spt} x resistência lateral e com a resistência de ponta de estacas de qualquer natureza para regiões sem experiência prévia tem validade limitadíssima, onde ensaios devem ser realizados (provas de carga estática, por exemplo) para ajuste das correlações, antes do início dos estaqueamentos.

É relevante também ter presente que o atingimento das profundidades de projeto na execução do estaqueamento é condicionante de atendimento das condições de projeto e devem sempre ser informadas aos projetistas para que os mesmos aprovelem o estaqueamento, juntamente com as

demais informações de controle e ensaios. É importante referir a dispersão de valores quando compara-se as previsões de capacidade de carga com resultados de ensaios para sua determinação.

Tração

A resistência à tração de estacas é normalmente computada como: a) a soma da resistência lateral das estacas e seu peso próprio, quando relevante e significativo, com adequado fator de segurança, B) utilizando o método simplificado do cone.

Cuidado deve ser observado quanto à condição de presença do nível freático, que caracteriza a condição de submersão do peso da estaca e do bloco ($\gamma = 1,4 \text{ t/m}^3$).

Carregamento Horizontal

Uma vez definida a opção de solução de fundações por estacas, o projeto continua com a análise das componentes de carregamento sobre as estacas. No caso geral de carregamento axial, lateral e momentos, o projetista deve assegurar que cada uma delas cumpra com os critérios de aceitabilidade quanto à segurança contra ruptura e de desempenho (deslocamentos compatíveis com a função da superestrutura).

A solução para os esforços horizontais atuantes nas fundações de aerogeradores tem usualmente como prática o cálculo das estacas submetidas a estas solicitações, sendo explicitada na recomendação francesa (Recommendations sur la Conception, le calcul, 2011, a restrição ao uso do empuxo passivo resistente ao deslocamento do bloco ou eventualmente ao atrito bloco x solo na base do bloco.

Os esforços horizontais atuantes nas fundações podem ser resolvidos em projeto de duas maneiras, dependendo do tipo de estaca utilizado: uso de elementos inclinados formando um cavalete, com estacas comprimidas e tracionadas ou dimensionamento de estacas verticais com solicitações horizontais. Alguns fabricantes de turbinas exigem a utilização de estacas inclinadas como solução.

Tabela 1: Características dos modelos de cálculo de carregamento horizontal

Modelo	Brinch Hansen	Broms	MSHEET	P-Y	3-D M.E.F.
carga ultima	sim	sim	sim	sim	sim
base em testes	não	não	não	sim	não
base analítica	sim	sim	sim	sim	sim
base análise P-Y	não	não	não	sim	não
Tipo de solo					
coesivos	sim	sim	sim	sim	sim
granulares	sim	sim	sim	sim	sim
estratificados	sim	não	sim	sim	sim
não linearidade	não	não	bilinear	sim	sim
Tipo carregamento					
horizontal	sim	sim	sim	sim	sim
momento	sim	sim	sim	sim	sim
axial	não	não	não	sim	sim
cíclico	não	não	não	sim	sim

Estaca					
não linear(1)	não	não	não	sim	sim
EJ constante (2)	não	não	não	sim	sim

(1) estaca não linear significa que EJ da estaca é função do momento fletor

(2) EJ não constante significa que a estaca pode ser dividida em trechos de diferente rigidez

Fadiga

A consideração dos efeitos do carregamento cíclico no desempenho de fundações de aerogeradores foi recentemente incorporada aos itens de projeto na publicação BSH: Standard “Design of offshore wind turbines” BSH No.7005, de forma que não há uma grande variedade de métodos práticos de análise. Uma combinação de métodos baseados no carregamento estático com modelos de transferência de carga que incorporam degradação da resistência lateral constitui uma alternativa prática para análise do problema (algoritmo RATZ, Randolph 2003). Em um solo estratificado, a estaca é dividida em segmentos onde as propriedades mecânicas (resistência ao cisalhamento e rigidez) do solo possam ser consideradas constantes.

Para análise e projeto do bloco, dados a serem fornecidos pela geotecnia para o projetista estrutural, como detalhado nas tabelas a seguir apresentadas referem-se a:

- Propriedades do solo;
- Condições do lençol freático;
- Agressividade do meio (pH da água);
- Coeficiente de recalque do solo, módulos do solo em determinados níveis de deformação para fundações diretas;
- Rigidez das estacas nos casos de fundações profundas, considerando cargas verticais e horizontais.

6.4 Controle Executivo

O projeto de fundações deve prever de forma detalhada os itens de avaliação e controle, de forma a garantir a execução de fundações que atendam às necessidades de qualidade e desempenho das mesmas. Exigências contratuais e de seguro normalmente exigem a comprovação da rastreabilidade dos elementos executados bem como a conformidade com a normalização.

6.5 Liberação Documentada

Deve ser estabelecido na etapa de projeto um programa de comprovação das premissas de projeto e controle construtivo, com liberações em etapas, após o conhecimento das reais condições executivas, especialmente quando diferentes daquelas especificadas em projeto.

- Fundações em Radier: caso de apoio em solo, necessariamente deve ser feita prova de carga em placa para comprovação da condição de módulo do solo na cota de implantação. Alternativamente poderá ser feito ensaio tipo CPT “calibrado” com relação à condição de projeto.
- Fundação em estacas: desejável a liberação em etapas, de forma a permitir a adoção de providências naqueles casos de “não conformidade”.

Fase 1: Registro construtivo – liberação para arrasamento das estacas, após verificação das condições construtivas (negas em estacas cravadas, registros do monitoramento nas estacas Hélice Contínuas, registros construtivos em estacas raiz);

Fase 2: Com as estacas arrasadas, verificação de dados como as excentricidades,

resistência do concreto, posicionamento das armaduras, outros detalhes construtivos, liberação para ensaios nos elementos ao nível da base dos blocos;

Fase 3: realização de ensaios nas estacas executadas, para comprovação de integridade (PIT), realização de provas de carga estáticas (PCE) e ensaios dinâmicos (PDA), de acordo com a NBR 6122/2010 – ABNT (Norma de Projeto e execução de fundações) para a determinação do comportamento das fundações em estacas, ensaios nos tirantes quando esta for a solução, e liberação para execução dos blocos.

6.6 Desafios da etapa de projeto

Os desafios de uma solução considerando a etapa de projeto podem ser descritos como:

- Conhecer previamente todos os requisitos técnicos a serem cumpridos pelas fundações, as cargas identificadas nas condições para as quais as fundações devem ser dimensionadas (resultantes do cálculo estrutural), as especificações dos possíveis sistemas ou soluções certificadas, se existentes, e demais exigências dos fabricantes;
- Identificar a solução segura que atenda a todos os condicionantes geotécnicos e de desempenho necessário, definidos pelos fabricantes de turbinas, que seja ao mesmo tempo econômica, rápida na execução e de custo compatível;
- Escolher somente dentre as soluções com equipamentos e executantes disponíveis, com características comprovadamente aceitáveis pelos fornecedores de equipamento do parque;
- Quando ocorre variabilidade de condições geotécnicas (perfis de subsolo com características muito diferentes) como apresentado na Figura 9 identificar áreas com condições similares e projetar as fundações adequadas para cada área, não utilizando soluções inadequadas somente pela condição de ser possível sua utilização em todo o parque, sem atender aos demais quesitos desejáveis (usualmente prazos construtivos e custos reduzidos);
- Identificar as propriedades geotécnicas necessárias para o dimensionamento seguro do sistema escolhido;
- Definir de forma inequívoca a condição de execução de cada base, sem a adoção de soluções “padrão” não compatíveis com as características ou do processo construtivo ou da variabilidade dos perfis do subsolo;
- Especificar de forma clara os itens de fiscalização e controle, definindo ensaios e demais procedimentos para a rastreabilidade e garantia de desempenho seja obtida e documentada.

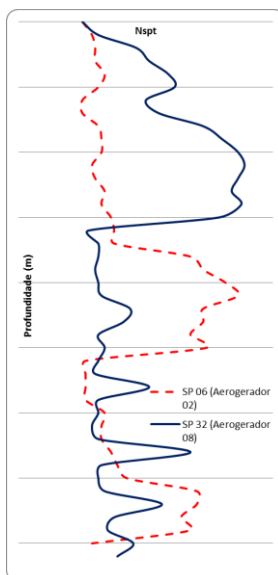


Figura 9 – Exemplo de variabilidade de situações de ocorrência de subsolo em mesmo parque

7 Exemplos de obras projetadas

Caso 1 – Solução em Estacas Hélice Contínua verticais em obra no litoral do Rio Grande do Sul:

As figuras abaixo mostram os perfis característicos de site no Rio Grande do Sul, com a presença de materiais moles em profundidades variáveis. Foram executadas duas sondagens de simples reconhecimento e um perfil em Cone por base, com a finalidade de melhor caracterização da variabilidade das condições do subsolo. A solução que melhor atendeu às características de carregamento e de subsolo foi a de estacas Hélice Contínua Monitorada com 60 cm de diâmetro, com profundidades variáveis entre 14 e 27 metros de comprimento.

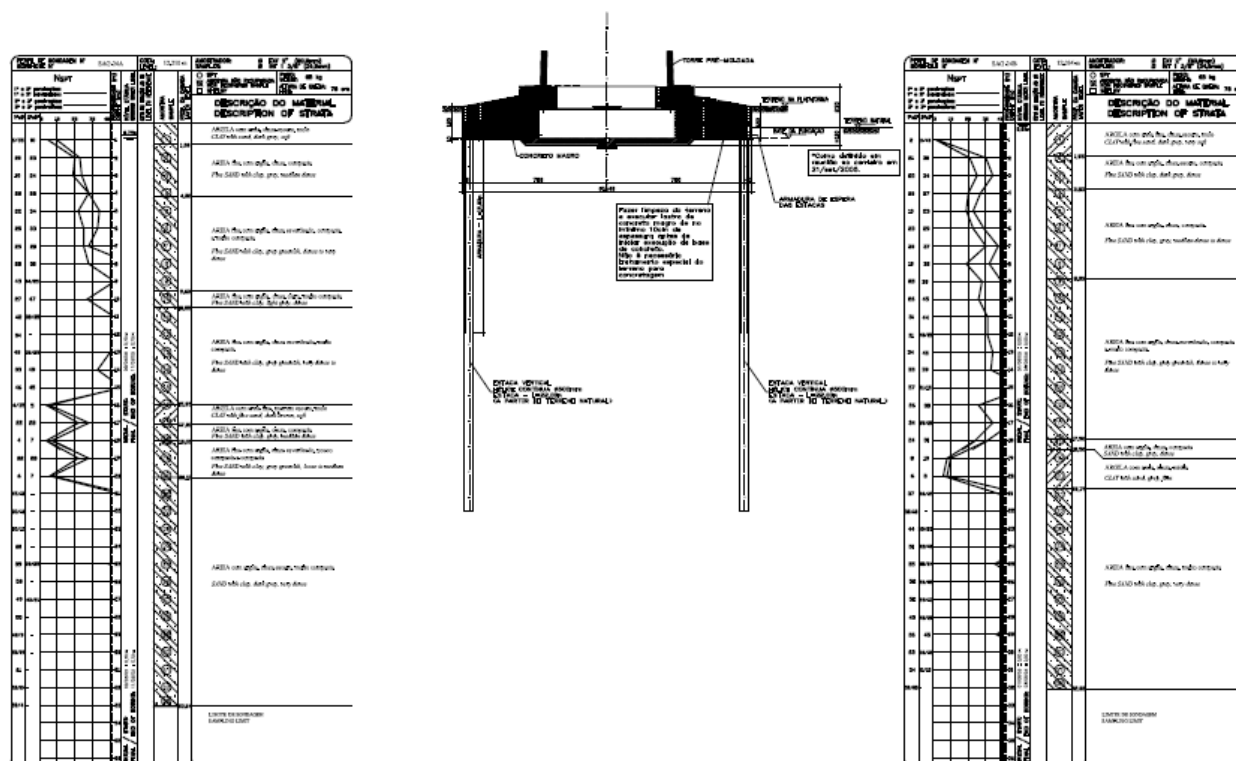


Figura 10. Caso de obra com solução em estacas hélice contínua

Caso 2 – Solução em Estacas Hélice Contínua longas, curtas e estacas Raiz em parque no Nordeste:

A seguir são mostrados os perfis característicos de site no Nordeste, com a presença de materiais de alta resistência em profundidades variáveis.

A preferência do Cliente foi a de usar, sempre que tecnicamente cabível, soluções em Hélice Contínua Monitorada (HC). Nas situações onde tal opção não era exequível, foram projetadas estacas Raiz. Face às características dos três grupos de perfis, do ponto de vista de presença da camada resistente, naquelas situações onde a capacidade de carga mobilizável pelas estacas HC era elevada, utilizou-se 16 estacas no bloco. Onde as profundidades atingidas na execução das estacas não mobilizava a carga decorrente da situação de 16 estacas, projetou-se 32 estacas, com a mesma geometria de bloco.

Somente nas situações onde as estacas HC eram inexequíveis (muito curtas sem adequada capacidade de carga), foram projetadas estacas Raiz, capazes de atingir profundidade competente para a transferência de cargas, ainda com o mesmo bloco.

Desta forma, soluções mais rápidas na execução de menor custo foram utilizadas onde possível, e solução mais lenta, mais cara, mas segura do ponto de vista de desempenho, utilizada somente nos locais onde a solução ótima não foi possível.

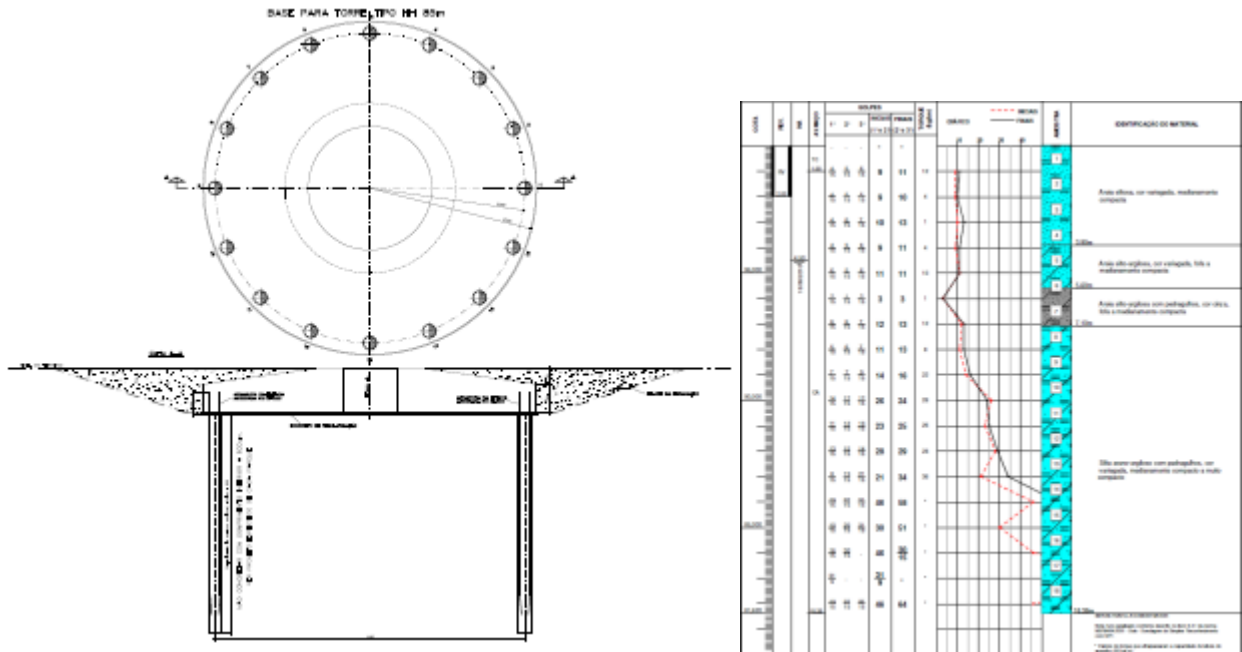


Figura 11. Solução em 16 estacas Hélice Continua, em perfis mais profundos, com estacas com maior carga

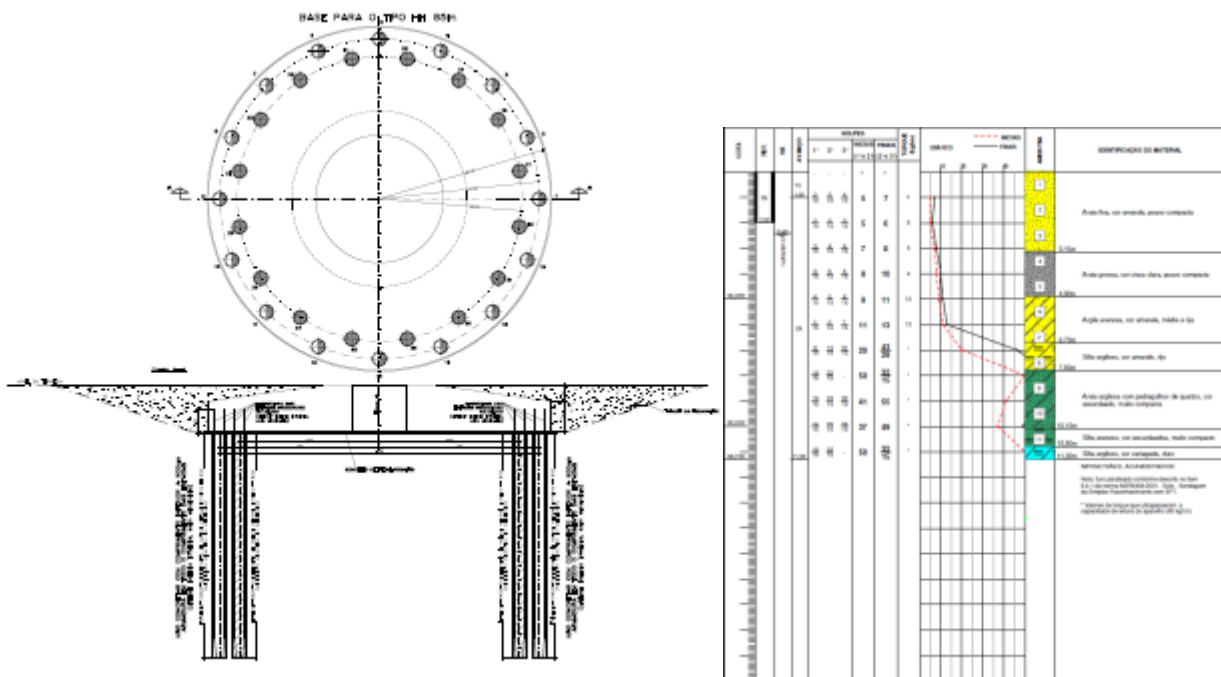


Figura 12. Solução em 32 estacas Hélice continua onde a profundidade executiva era limitada, com estacas transferindo menor carga ao subsolo

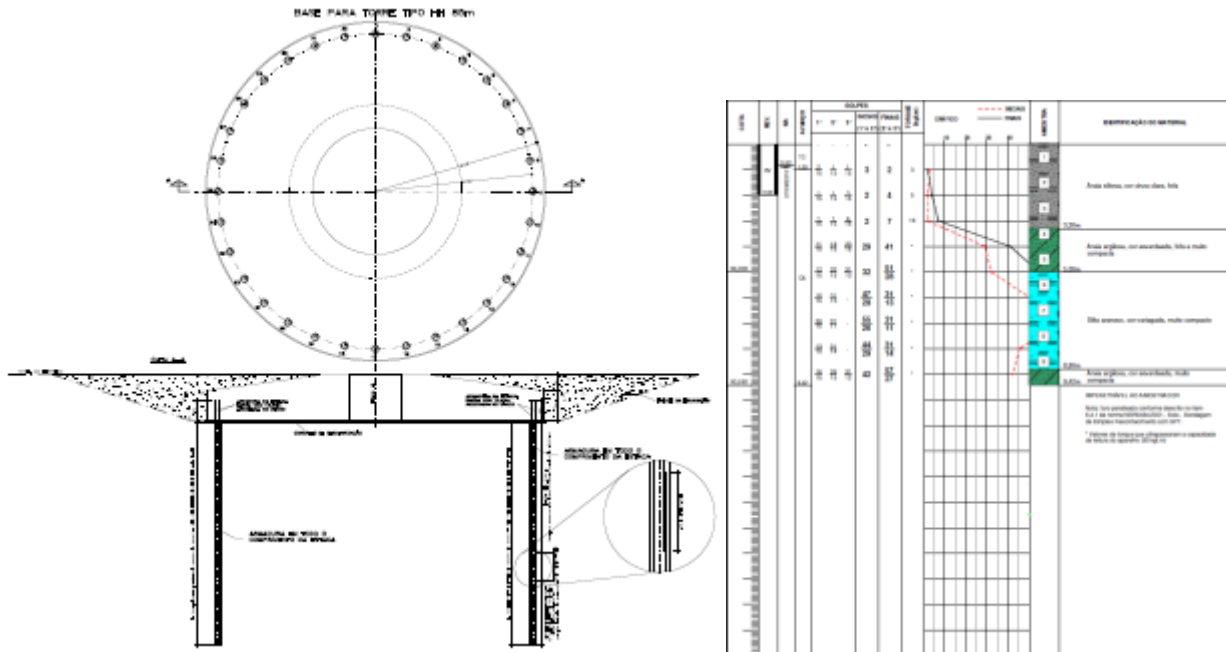


Figura 13. Solução em 32 estacas Raiz, naqueles casos em que a profundidade executiva das estacas Hélice era insuficientes mesmo para cargas reduzidas

Caso 3 - Estacas metálicas inclinadas em obra no litoral do Rio Grande do Sul:

A figura abaixo mostra o perfil típico em parque de aerogeradores no litoral do Rio Grande do Sul, com a presença de camadas profundas de argila mole e camadas subsuperficiais de materiais granulares compactos. A opção de solução foi de usar estacas metálicas inclinadas, transferindo as cargas para as camadas profundas, garantindo a rigidez da fundação e evitando as deformações das camadas moles.

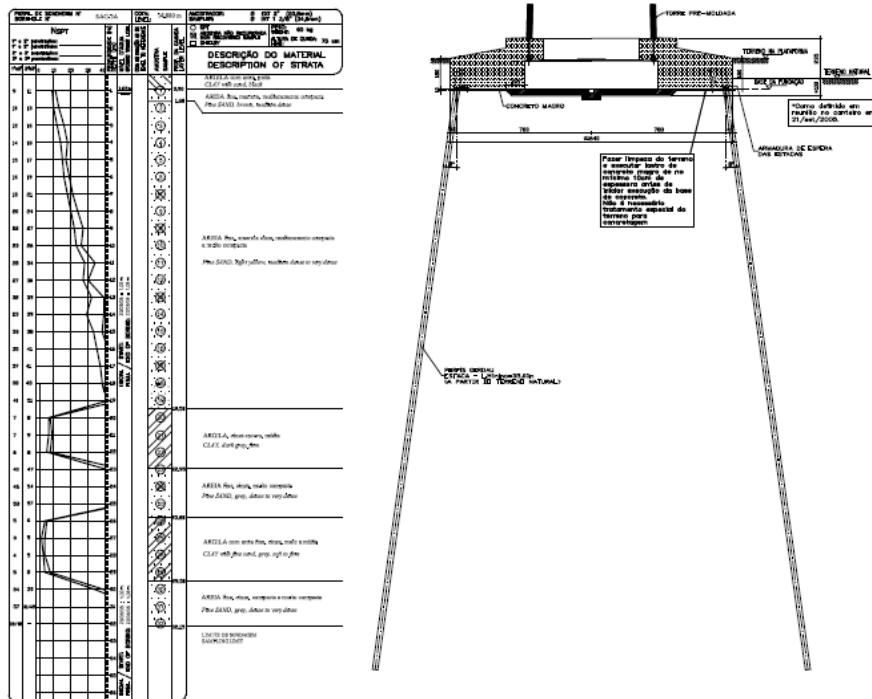


Figura 14. Caso de obra com solução em estacas metálicas

Caso 4 – Solução em fundações diretas ancoradas com tirantes em Santa Catarina:

A figura a seguir mostra solução em fundações diretas com tirantes para prover capacidade nas solicitações de tração em locais com a presença de perfis característicos de basalto alterado.

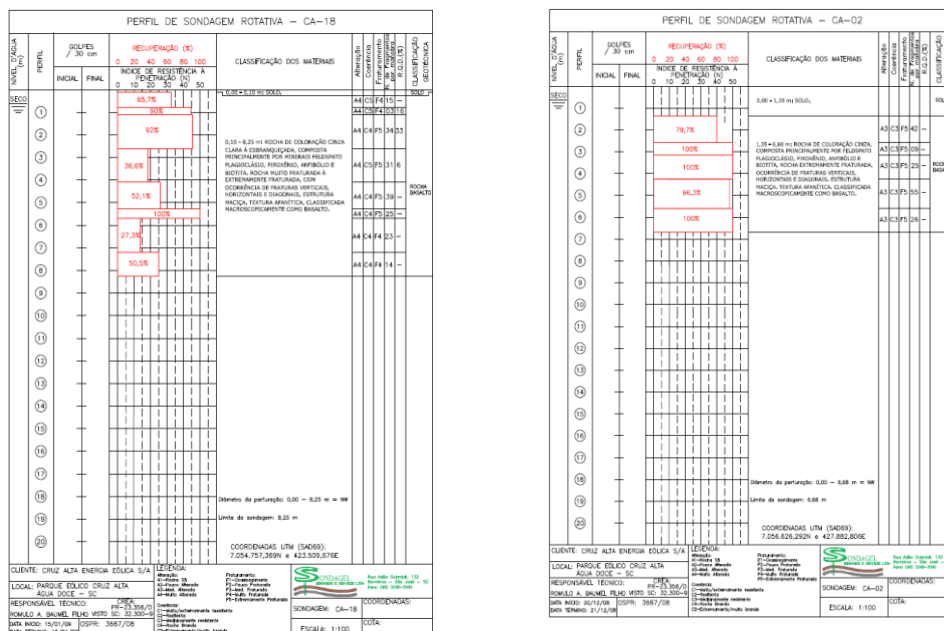


Figura 15. Sondagens para obra com solução em sapata atirantada

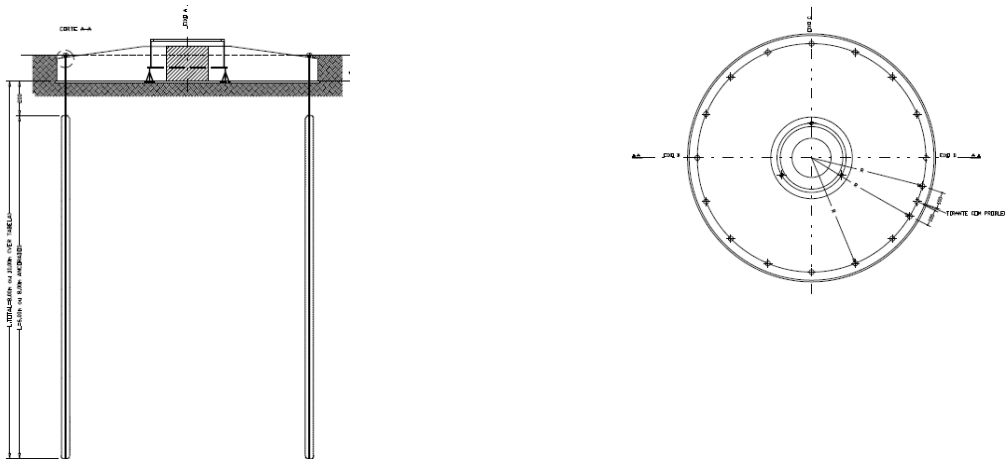


Figura 16. Caso de obra com solução em sapata atirantada

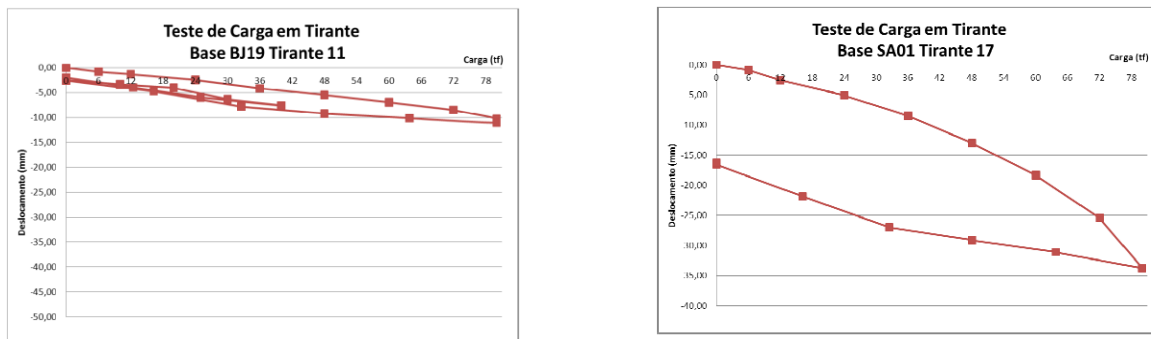


Figura 17. Ensaios em 100% dos tirantes, com execução de reinjeção ou reforços nos casos de comportamento não satisfatório (figura direita)

8 Comentários Finais

A presente contribuição visa disseminar a experiência adquirida ao longo de anos na solução de problemas de projeto de fundações de aerogeradores em seus vários aspectos, facilitando para os engenheiros sem experiência na área o entendimento dos vários aspectos específicos necessários para a boa condução dos projetos, em suas distintas etapas.

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta contribuição somente foi possível com a colaboração do Eng. Matheus Miotto Rizzon na organização e identificação de elementos essenciais à sua finalização. Agradeço ao amigo, parceiro e sócio Eng. Wilson Borges pela contribuição na elaboração dos projetos que fazem parte da história das fundações de aerogeradores em nosso escritório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Milititsky, J. - Fundações de Torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicações, 2019, Oficina de Textos.

- Bureau Veritas – “Guidelines for Design of Wind Turbines – DNV/RisØ” 2016
- AWEA/ASCE, 2011 “Recommended Practice for Compliance of Large Onshore Wind Turbine Support Structures,
- CFMS. Recommandations sur la conception, le calcul, l’exécution et le contrôle des fondations d’éoliennes (2011), versões em frances e ingles
- Gamesa – Requirements for a foundation calculation report – WEM40307
- Gamesa – Requirements to be fulfilled in a foundation design – WEM40306 2012 - VESTAS
- CSA Guide to Canadian wind turbine - codes and standards – Canadian Standards Association - 2008
- GE Power & Water Technical Specification - Information on the Design, Detailing and Execution of the Foundation for the Wind Turbine Generator System
- Acciona. AW3000 Foundation Technical Requirements. Doc DG200297. 2012.
- Gamesa. Geotechnical data required for the design of foundations. Code GD051045-en Rev 0. 2008.
- Vestas. 3rd Party Foundation Design. Doc 0046-9182 V01. 2012.
- Vestas. Foundation Loads. V110-2.0MW, Mk10A/B, IEC3C, 80m (T2x203). Doc 0046-3853 Ver 00. 2007.
- ALSTOM. Foundation Design Requirements ECO 122 T89. DST-0795 REV 0. 2015.
- RENOVA Energia. Especificação Técnica Tirantes. ET-EOL-008-GER-026. Rev 00. 2015.
- ENERCON. Specification. Catalogue of specification for soil investigations. PM-CE-SP003. 2015.
- ENERCON. Specification. Catalogue of specification for soil investigations in rock. PM-CE-SP004. 2015.
- EDF. Instructions – Specifications of soil surveys for wind farms. 2009-ST-058-B. 2013.
- ACCIONA. Load Calculation – Foundations Loads. AW125/3000 IEC-IIIa – TH 120 – AW 61.2. LC_FL_3CAP1. 2013.
- ACCIONA. Geotechnical characterization in wind farms. Doc DG200076. 2013.