



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Construção de um Parque Eólico Industrial

YESMARY CAROLINA DA SILVA GOUVEIA
(Licenciada em Engenharia Civil)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Área de Especialização de Edificações

Orientador (es):

Especialista, Engenheiro João António Antunes Hormigo
Doutor Pedro Matos Soares

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Almeida Vasques

Vogais:

Especialista Engenheira Maria Hortense Baeta
Especialista, Engenheiro João António Antunes Hormigo
Doutor Pedro Matos Soares

Novembro de 2013

Agradecimentos

Dirijo os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta tese.

Aos meus orientadores, Engenheiro João António Antunes Hormigo e Doutor Pedro Matos Soares, por quem tive o privilégio de ser orientada, pela disponibilidade, boa disposição sempre demonstrada e pela forma como orientaram este trabalho, cujo contributo foi fundamental para o resultado final.

Ao Engenheiro Jorge Reis Barros pela disponibilidade e pela sabedoria, sempre soube auxiliar quando mais requeri.

Ao Engenheiro António Gorgulho pelo auxílio e apoio prestados.

A todos os meus amigos que foram incansáveis, que me incentivaram sempre e animaram nos momentos mais difíceis. Em especial ao Nuno Amaro, Marilyne Antunes, Joana Teixeira, meninas da residência e às “gostasas”.

A toda a minha família, com especial ênfase á minha mãe e ao meu pai, pelo incansável amor, dedicação, confiança e apoio dado ao longo dos anos da minha vida. Sem todos eles teria sido impossível a concretização de este sonho.

Muito Obrigada!

Resumo

As energias renováveis têm vindo a suscitar interesse crescente para a produção industrial de eletricidade. A necessidade de satisfazer a procura de energia a nível global, os choques petrolíferos na segunda metade do século XX com o mundo ocidental refém dos países produtores, o aumento das emissões de CO₂ e o aquecimento global, e a previsível escassez do petróleo em poucas décadas conduziram à procura de soluções alternativas, mais limpas e renováveis.

Como principal alternativa para a produção de energia, as fontes renováveis são as mais apelativas no que respeita a segurança, qualidade e redução dos danos ambientais. De todas as energias renováveis existentes a energia eólica suscita um grande interesse, porque para além de ser renovável e limpa, possui uma melhor relação custo benefício para exploração.

De modo a desenvolver e aproveitar esta fonte energética foi fundamental promover o desenvolvimento tecnológico das turbinas eólicas e instalá-las em zonas de elevado potencial eólico.

Na presente dissertação, pretende-se apresentar o processo de construção de um parque eólico industrial para a produção de energia elétrica, tendo-se desenvolvido um caso de estudo exaustivo de um parque eólico.

A construção de um parque eólico passa por processos sistemáticos, um dos quais é o estudo do local pré-selecionado, com o objetivo de conhecer a viabilidade e rentabilidade associada à zona de implantação do futuro parque.

Após concluir-se que o local pré-selecionado é viável, e após aprovação do Estudo de Impacto Ambiental, procede-se ao estudo técnico da localização dos aerogeradores, subestação e edifício de comando.

Posteriormente, seguem-se os processos de lançamento de concursos para a elaboração dos projetos de execução das diversas especialidades, concursos para as obras a realizar, adjudicação e execução.

Ainda antes da fase de implantação dos aerogeradores no terreno, é de primordial importância que se execute o estudo geológico/geotécnico do local de implantação, para se decidir qual o tipo de fundação adequada para as torres eólicas que suportarão os aerogeradores.

Construído o parque, haverá que cumprir as exigências definidas no Estudo de Impacto Ambiental, sendo em geral efetuada a recuperação da flora da área afetada para que os impactos ambientais sejam minimizados.

Palavras-Chave: Energia eólica, Parque Eólico, Estudo geológico/geotécnico, Infra-estruturas do parque eólico, Fundação de torres eólicas.

Abstract

The interests on renewable energies have been rising in industrial production of electricity. The need to meet the increasing demand for global energy, the uncertainty associated to the oil shocks in the second half of the twentieth century with the western world hostage of producing countries, the increase in CO₂ emissions and global warming, and the anticipated shortage of oil in a few decades led to demand of cleaner and renewable alternatives.

As the main alternative to energy production, renewable energies are the most appealing with regard to safety, quality and reducing environmental impact. Out of all existing renewable energy sources, wind power arouses great interest, because in addition to being renewable and clean, has a better cost benefit for exploration.

In order to develop and take advantage of this energy source was essential to promote technological development of wind turbines and its installation in areas with high wind potential.

In this dissertation, we intend to present the process of construction of an industrial wind farm for the production of electricity, having developed a case of exhaustive study of a wind farm. The construction of a wind power plant goes through various systematic processes, one of which is the study of the pre-selected location, in order to know the feasibility and cost associated with deployment of the future park area.

After concluding that the pre-selected location is feasible, and after approval of the Environmental Impact Study, we proceed to the technical study of the location of the wind turbines, substation and control building.

Subsequently, follow-up, the process of tendering for the elaboration of projects for the implementation of various specialties, tenders for the works to be undertaken, adjudication and execution.

Even before the implementation phase of the wind turbines on the ground is fundamental to perform the geological / geotechnical study of the site of implantation, to decide what type of foundation is suitable for the wind towers that will support the turbines.

Built the park, which will fulfill the requirements of the Environmental Impact Study, and generally made the recovery of the affected flora so that environmental impacts are minimized area.

Keywords: Wind Energy, Wind Park, Geological Survey / Geotechnical, Infrastructure wind park, wind towers Foundation

Índice de Texto

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento geral	1
1.2	Objetivo do trabalho.....	2
1.3	Organização da dissertação	2
2	Caracterização da produção industrial eólica no Mundo, na Europa e em Portugal	5
2.1	Perspetiva histórica	5
2.2	Perspetiva no Mundo.....	9
2.3	Na Europa	13
2.4	Situação em Portugal	16
2.5	Contribuição da empresa EDP - Energias de Portugal, para a expansão da energia eólica.....	18
3	Caracterização do local para a implementação de um Parque Eólico Industrial	21
3.1	Escolha da localização do Parque Eólico	21
3.2	Estudo do regime de ventos e do seu potencial eólico	22
3.2.1	Regime de ventos.....	22
3.2.2	Potencial Eólico	25
3.3	Estudo geológico-geotécnico.....	26
3.4	Caracterização dos acessos ao parque.....	32
3.4.1	Acessos e Vias	32
3.4.2	Parâmetros a considerar nas rodovias.....	34
3.4.2.1	Peso	34
3.4.2.2	Drenagem.....	34
3.4.2.3	Rasante.....	34
3.4.3	Trabalhos a realizar nos acessos e nas plataformas de montagem.....	34
3.5	Obra de engenharia civil	36
3.5.1	Plataformas	36
3.5.1.1	Regras para a implantação das plataformas.....	37

3.5.2	Fundação	37
3.5.2.1	Processo de construção da sapata.....	38
3.5.2.2	Utilização de estacas na sapata	39
3.5.3	Valas para cabos.....	40
3.5.3.1	Tubagem longitudinal	40
3.5.3.2	Tubagem para travessias	41
3.5.4	Edifício de Comando e Subestação.....	42
4	Constituição de um Parque Eólico	45
4.1	Principais elementos de um parque eólico.....	45
4.2	Funcionamento do aerogerador.....	45
4.3	Componentes do sistema	46
4.3.1	Rotor	48
4.3.2	Cabina – <i>Nacelle</i>	49
4.3.3	Torre.....	50
5	Caso de estudo para a construção de um Parque Eólico Industrial.....	51
5.1	Localização.....	51
5.2	Principais características do Parque eólico.....	52
5.3	Estudo de Impacto Ambiental	53
5.4	Execução da Obra Civil	53
5.4.1	Regime de ventos.....	53
5.4.2	Estudo geológico geotécnico	54
5.4.3	Descrição da Fase de construção.....	55
5.4.3.1	Instalação do estaleiro.....	55
5.4.3.2	Acessos ao parque e vias no parque.....	55
5.4.3.3	Fundação	57
5.4.3.3.1	Introdução do SAP 2000	57
5.4.3.3.2	Descrição dos materiais utilizados na sapata	57
5.4.3.3.3	Dimensionamento da fundação	58
5.4.3.3.4	Armadura da sapata	65
5.5	Plataformas para montagens dos aerogeradores	71

5.6	Montagem do parque.....	72
5.7	Recuperação das áreas afetadas	72
5.8	Planeamento	73
5.9	Orçamento.....	75
6	Conclusão	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS	i

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Moinhos de vento [s38].	5
Figura 2.2 - Grandpa' s Knob, turbina eólica, Vermont [s32].	6
Figura 2.3 - Evolução do tamanho das turbinas eólicas ao longo dos anos [s37].	8
Figura 2.4 - Crescimento do Parque Eólico Mundial, em 16 anos [s12] (GW).	10
Figura 2.5 - Capacidade Mundial instalada de energia eólica (GW) [4].	10
Figura 2.6 - Dez maiores mercados de produção de energia eólica no final de 2011 [4].	11
Figura 2.7 - Capacidade Eólica instalada nos EUA (GW) [4].	12
Figura 2.8 - Países com maior crescimento de energia eólica em 2012 [s12].	12
Figura 2.9 - Os 10 países com maior potência eólica instalada [s12].	13
Figura 2.10 - Distribuição da produção de eletricidade por fonte, 2012 [s13].	14
Figura 2.11 - Instalação anual de energia eólica na União Europeia, GW [5].	14
Figura 2.12 - Energia Elétrica gerada na União Europeia de 2000 a 2012 (GW) [5].	15
Figura 2.13 - Acumulado de energia eólica instalado na UE (GW) [5].	15
Figura 2.14 - Capacidade global instalada de energia eólica (MW) [6].	16
Figura 2.15 - Capacidade geradora acumulada em Portugal (2010) [s16].	17
Figura 2.16 - Localização dos Parques Eólicos em Portugal [s15].	18
Figura 2.17-Parques eólicos da EDP, em Portugal [s22].	19
Figura 2.18-EDP Renováveis no Mundo, 2011 [7].	20
Figura 3.1 - Variação da velocidade do vento com a altura [9].	22
Figura 3.2 - Torre meteorológica [64].	24
Figura 3.3 - Anemómetro de conchas de Robinson [s25].	25
Figura 3.4 - Raio de curvatura para as vias [9].	33
Figura 3.5 - Exemplo de uma plataforma de montagem [9].	35
Figura 3.6 - Perfil transversal tipo da via de acesso [9].	36
Figura 3.7 - Exemplo da grua utilizado para a plataforma [s35].	36
Figura 3.8 - Plataformas de montagem [9].	37
Figura 3.9 - Exemplo de fundação [s36].	38
Figura 3.10 - Execução das estacas [s27].	40
Figura 3.11 - Vala longitudinal [9].	41
Figura 3.12 - Vala para cruzamento de vias [9].	42
Figura 3.13 - Edifício de comando [2].	43
Figura 3.14 - Exemplo de subestação [s34].	43
Figura 4.1 - Principais elementos de um parque eólico industrial [13].	45
Figura 4.2 - Processo de Energia Eólica [s28].	46

Figura 4.3 - Esquema de uma típica turbina eólica [1].	47
Figura 4.4 - Rotor [s39].	49
Figura 4.5 – Cabina [s40].	49
Figura 4.6 - Exemplo de torres: a) torre tubular; b) torre treliçada [1].	50
Figura 5.1 - Localização geográfica do Parque Eólico na freguesia da Tocha.	51
Figura 5.2 - Exemplo de uma caixa de queda para passagem hidráulica [16].	56
Figura 5.3 - Caminho de cabos [2].	57
Figura 5.4 - Fundação de torre eólica. Corte (mm).	59
Figura 5.5 - Fundação de torre eólica. Geometria em planta (m).	60
Figura 5.6 - Ações exercidas na sapata.	60
Figura 5.7 - Deformação da sapata.	61
Figura 5.8 - Representação dos momentos: a) OX; b) OY.	62
Figura 5.9 - Dimensionamento das armaduras nas estacas.	62
Figura 5.10 - Estaca com 22 metros de comprimento.	63
Figura 5.11 - Verificação das estacas.	65
Figura 5.12 - Área da armadura.	66
Figura 5.13 - Folha Excel da armadura da estaca.	67
Figura 5.14 - Áreas de secções de varões, (cm²).	67
Figura 5.15 - Deformação da fundação, 11m.	68
Figura 5.16 - Representação dos momentos: a) OX; b) OY.	68
Figura 5.17 - Dimensionamento das armaduras nas estacas.	69
Figura 5.18 - Estaca com 11m de comprimento.	69
Figura 5.19 - Verificação das estacas AG01.	70
Figura 5.20 - Excel da estaca.	71
Figura 5.21 – Planeamento do Parque Eólico Industrial.	75

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Causas das emissões de dióxido de carbono.	9
Tabela 2.2 - Produção percentual de eletricidade por fontes [s13].....	13
Tabela 5.1 – Dimensões dos elementos do Parque.....	52
Tabela 5.2 - Características principais do betão utilizado.	58
Tabela 5.3 – Características do Aço.	58
Tabela 5.4 – Ações resultantes.....	60
Tabela 5.5 - Orçamento do Parque Eólico.	75

Abreviaturas e Símbolos

a.C - antes de cristo

MW - Megawatts

KW - Kilowatts

CO₂ - Dióxido de Carbono

GW - Gigawatts

EDP - Energias de Portugal

P_{tot} - Potência total de um fluxo de ar

m - Massa energia cinética

E_c - Energia Cinética

P - Potência do vento medida em Watt, (W)

V - Velocidade do vento medida em metros por segundo, (m/s)

A - Área circular

ρ - Densidade do ar seco

C_p - Coeficiente de potência

CBR - California Bearing Ratio

EIA - Estudo de impacto ambiental

σ_{terreno} - Valor da tensão admissível do terreno

PEAD - Polietileno de alta densidade

Ohm - Unidade de medida da resistência elétrica

EN335-1 - Estrada nacional 335- 1

RND - Rede Nacional de Distribuição

KV - Kilovolts

AG01 - Aerogerador número um

AG02 - Aerogerador número dois

AG03 - Aerogerador número três

AG04 - Aerogerador número quatro

AG05 - Aerogerador número cinco

UG1 - Primeira unidade Geológica

UG2 - Segunda unidade Geológica

S3 - Terceira Sondagem

ZG1 – Primeira zona geotécnica

XS3 - Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos

f_{ck} - Valor característico de tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade

f_{cd} - Valor de cálculo da tensão de rotura do betão á compressão

F_{ctm} - Valor médio da tensão de rotura do betão á tração simples

F_{ctk} - Valor característico da tensão de rutura do betão à tracção simples

E_{cm} - Módulo de elasticidade secante do betão

ν_c - Coeficiente de Poisson

γ_c - Coeficiente parcial de segurança relativo ao betão

F_{yk} - Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado

F_{yd} - Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado

E_s - Valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço de uma armadura para betão armado

E_{yd} – valor de calculo da extensão de cedência do aço

γ_s - fator parcial de segurança relativo às características resistentes do aço

F_z – Força exercida no eixo do z

F_{res} – Força resultante

M_z – Momento em torno de z

M_{res} – Momento resultante

γ – Peso volúmico do solo

h - Altura

$B = d = \emptyset$ - Diâmetro da estaca

Sondagem S1 – $(\phi'_{\text{médio}})$ - Ângulo de resistência ao corte para a sondagem número 1

Sondagem S2 → $(\phi'_{\text{médio}})$ - Ângulo de resistência ao corte para a sondagem número 2

ϕ'_{k} - Valor característico, considerando os resultados correspondentes a todos os ensaios

F_{vertical} - Força vertical

D_c – Profundida crítica

D_b – Comprimento da estaca

$\sigma'_{v \text{ máx}}$ – Tensão efetiva vertical máxima

N_q – Coeficiente de profundidade

$q_{b,k}$ – Valor característico da capacidade resistente de ponta

$R_{b,k}$ – Valor característico da resistência de ponta

A_p - Área de ponta da estaca

K - Capacidade resistente lateral

K_0 – Coeficiente de impulso em repouso

δ - Ângulo de resistência ao corte na interface estaca – areia

$q_{s,k}$ - Valor característico da capacidade resistente lateral

$R_{s,k}$ - Valor característico da resistência lateral

$R_{c,d}$ - Valor de cálculo da capacidade resistente

γ_b - Coeficiente de segurança parcial relativo à resistência de ponta

γ_s - Coeficiente de segurança parcial relativo à resistência lateral

γ_{mod} – Fator de modelo

W – Peso da estaca

F_{cd} – Valor de cálculo da força axial de compressão atuante

M_{sd} – Valor de cálculo do momento flector actuante

z – Braço do binário

d_1 – Altura da sapata

$A_{s/m}$ – Área da secção mínima de armaduras

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

Com o passar do tempo as fontes de energia foram sendo substituídas. Registou-se uma diferença no primórdio do segundo milénio relativamente às épocas mais recentes, em que antes as fontes energéticas, nomeadamente, o vento, a água e a combustão de materiais lenhosos tinham um domínio na produção de calor e da força motriz. Recentemente, no século XX, essas fontes tradicionais foram permutadas por novas fontes, como o carvão, o petróleo, o gás natural e a energia por desintegração controlada do átomo - nuclear, com singularidade nos países que se foram industrializando [1].

O século XX marca a tomada de consciência de que os recursos naturais são finitos, que o aquecimento global com efeitos indesejáveis no clima é uma realidade e que algo tem de ser feito, no sentido de controlar e reduzir a emissão de gases poluentes, causadores do efeito de estufa e responsáveis pelo aquecimento global.

Com o objetivo de proteger o planeta e garantir o futuro de gerações vindouras, surgiu o Protocolo de Quioto. Este Protocolo, que culmina com um vasto conjunto de iniciativas anteriores foi aprovado no dia 15 de Março de 1998 e consiste num tratado internacional com compromissos mais rígidos que os anteriores para a diminuição da emissão dos gases nocivos para o nosso planeta [s1].

A 27 de Setembro de 2001 foi aprovada a Diretiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho Europeu, conhecida como a “Diretiva das Renováveis”. A diretiva é respeitante à promoção da eletricidade gerada a partir de fontes renováveis no mercado interno da eletricidade, fundamentada numa proposta da Comissão [1].

A Diretiva *“constitui uma parte substancial do pacote de medidas necessárias ao cumprimento do Protocolo de Quioto e à Convenção Quadro das Nações Unidas relativa às alterações climáticas”*. O propósito da diretiva passa pela criação de um quadro a partir de fontes renováveis de energia na União Europeia que facilite o aumento considerável a médio prazo da eletricidade produzida [1].

Com intuito de atingir o seu objetivo a Diretiva recomenda que *“seja exigido aos Estados – Membros que estabeleçam metas indicativas nacionais para o consumo de*

eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis” compatíveis com os “compromissos nacionais assumidos no âmbito dos compromissos relativos às alterações climáticas aceites pela Comunidade nos termos do Protocolo de Quioto” [1].

A contínua flutuação de preços dos derivados do petróleo, com tendência para o seu aumento, e as progressivas preocupações ambientais, conduziram a maior procura de outras formas de produzir energia, com especial enfoque nas fontes de energia renováveis.

Nos últimos 20 anos ocorreu um grande desenvolvimento tecnológico na energia renovável, nomeadamente a energia eólica, que conquistou adeptos e que se tornou numa fonte de energia renovável economicamente viável [2].

A produção de energia eólica é uma mais-valia para o planeta, pois utiliza recursos naturais inesgotáveis e económicos. A energia é renovável e limpa o que a torna benéfica para o meio ambiente [s2, s3].

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo fundamental desta dissertação é o estudo completo de implementação de um parque eólico industrial. Pretende-se com o presente trabalho estudar com acuidade as diferentes fases de concretização de um Parque industrial *onshore*.

Nesse sentido, serão abordados: o estudo do regime de ventos, a avaliação do potencial eólico do local, o estudo geológico-geotécnico, a ligação às redes elétricas na vizinhança do local para escoamento da energia produzida, e a construção do Parque, com foco em todas as suas infraestruturas da área da engenharia civil.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é composta por quatro capítulos, e foi estruturada da seguinte forma:

CAPÍTULO I – Este capítulo introdutório aborda considerações genéricas sobre o tema, descreve objetivos e descreve a organização dos vários capítulos da dissertação.

CAPÍTULO II- Desenvolve-se neste capítulo e de um modo sumário a análise da produção eólica industrial no mundo, na Europa e em Portugal.

CAPÍTULO III- Este capítulo aborda a caracterização do local para a implementação de um parque eólico Industrial: estudo do regime de ventos, estudos geológico/geotécnicos, caracterização dos acessos ao parque e infraestruturas da área da engenharia civil.

CAPÍTULO IV- É um capítulo de síntese sobre a constituição de um parque eólico industrial abrangendo as componentes e os principais elementos de um parque eólico.

CAPÍTULO V- Apresenta-se neste capítulo o detalhe das fases de construção de um parque eólico industrial – O Caso de Estudo, incluindo o estudo e dimensionamento dos acessos e plataformas, das fundações das torres de suporte dos aerogeradores, com referência às infraestruturas elétricas.

CAPÍTULO VI- Conclusões relevantes sobre a aprendizagem com o presente trabalho.

2 Caracterização da produção industrial eólica no Mundo, na Europa e em Portugal

No presente capítulo apresenta-se uma breve história da evolução da energia eólica (subcapítulo 2.1) e a sua perspetiva no mundo (subcapítulo 2.2), na Europa (subcapítulo 2.3) e em Portugal (subcapítulo 2.4). Por fim, pretende-se dar a conhecer a contribuição da empresa EDP na expansão da energia eólica em Portugal (subcapítulo 2.5).

2.1 Perspetiva histórica

Desde os tempos mais remotos que o homem usufrui da energia eólica, com naturalidade [s4]. Nos anos 5000 a.C., a energia produzida através do vento era utilizada para impulsionar os barcos ao longo do rio Nilo, facilitando o transporte de pessoas e bens. Já em 200 a.C., na China, a água era bombeada por moinhos de vento simples (Figura 2.1), enquanto na Pérsia e no Médio Oriente, o grão era moído por moinhos de vento de eixo vertical, com velas de tecido de cana [s5].



Figura 2.1 - Moinhos de vento [s38].

No século XI, no Médio Oriente, os moinhos de vento eram utilizados na agricultura. Os cruzados foram o veículo de transmissão da tecnologia para a Europa. Já no final do século XIX, com a colonização, o Novo Mundo (continente americano), passou a

utilizar os moinhos de vento para bombear a água para os terrenos e ranchos, para cortar madeira, e posteriormente, com o desenvolvimento da energia elétrica, para gerar eletricidade, para casas e indústrias [s5, s6].

A produção de energia elétrica a partir da fonte eólica, principalmente em áreas rurais, iniciou-se no século XX, através dos moinhos de vento, que começaram a ser utilizados para a produção de eletricidade [s7].

Na década de 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, foi desenvolvida a maior turbina eólica da época, capaz de gerar 1,25 megawatts (MW) de potência, para ventos com a velocidade de 48 Km/h. Esta turbina localizava-se no topo de uma colina em Vermont, nos Estados Unidos da América, era designada correntemente por Knob Grandpa's (Figura 2.2), e contribuía para alimentar a rede elétrica local [s5]. Após a Segunda Guerra Mundial, assistiu-se a um desenvolvimento massivo da exploração do carvão e do petróleo para a produção de energia primária, com a consequente redução de preços, o que resultou no afastamento da produção da eletricidade através do vento [s6, s8].



Figura 2.2 - Grandpa' s Knob, turbina eólica, Vermont [s32].

Na década de 70 do século XX (1970), com a primeira crise petrolífera, assistiu-se a uma redução da disponibilização do petróleo às economias ocidentais, com o consequente incremento de preços, o que recolocou na agenda a apetência por fontes de energia alternativas. Essa crise afetou todo o mundo, tornando-se vantajosa para as energias renováveis em geral e para as eólicas em particular, que voltaram a ser

objeto de estudo e desenvolvimento, tendo surgido no mercado novas turbinas eólicas, com o objetivo de gerar eletricidade de uma forma mais limpa e renovável [s5, s8].

Desde o ano de 1974 e até meados de 1980, as entidades dos EUA estiveram envolvidas com a indústria, através de um programa de apoio à energia eólica com a finalidade de investigar, desenvolver e implantar turbinas eólicas industriais de elevada potência [s6].

O primeiro resultado do programa de energia eólica deu-se no ano de 1975, com a instalação nos arredores de Cleveland, Ohio, da primeira turbina eólica da era moderna (Mod.0). Esta turbina possuía um rotor de duas pás, com 38 metros de diâmetro e gerava uma potência de 100 kW [1].

Já em 1981, empresas americanas e europeias, particularmente, suecas e alemãs, uniram-se em programas de investigação e desenvolvimento de turbinas de grande potência. Nessa década, nos EUA, desenvolveram-se turbinas de grandes dimensões, como por exemplo a turbina Boeing Mod 2, com 91 metros de diâmetro, que gerava 2,5 MW de potência, incorporando os mais recentes progressos tecnológicos da época. Em 1982 foram instaladas as turbinas americano-suecas, WTS3 (3 MW) e WTS4 (4MW) [Musgrove] [1].

Importa mencionar que nos anos 80, tanto na Europa (sobretudo na Dinamarca e Holanda) como nos EUA (em particular na Califórnia), foram instaladas as primeiras turbinas eólicas para exploração comercial, possuindo 10 a 20 metros de diâmetro, e gerando potências entre 50 kW e 100 kW [1].

De salientar, que os programas de investigação, em conjunto com a experiência positiva de operação com turbinas mais pequenas, foram relevantes, porque permitiram incrementar sucessivamente as dimensões das pás das turbinas eólicas, como se ilustra na Figura 2.3, tendo resultado em aumentos de produção de energia, pois quanto maior for o diâmetro do rotor, maior é a potência elétrica gerada pela turbina [1].

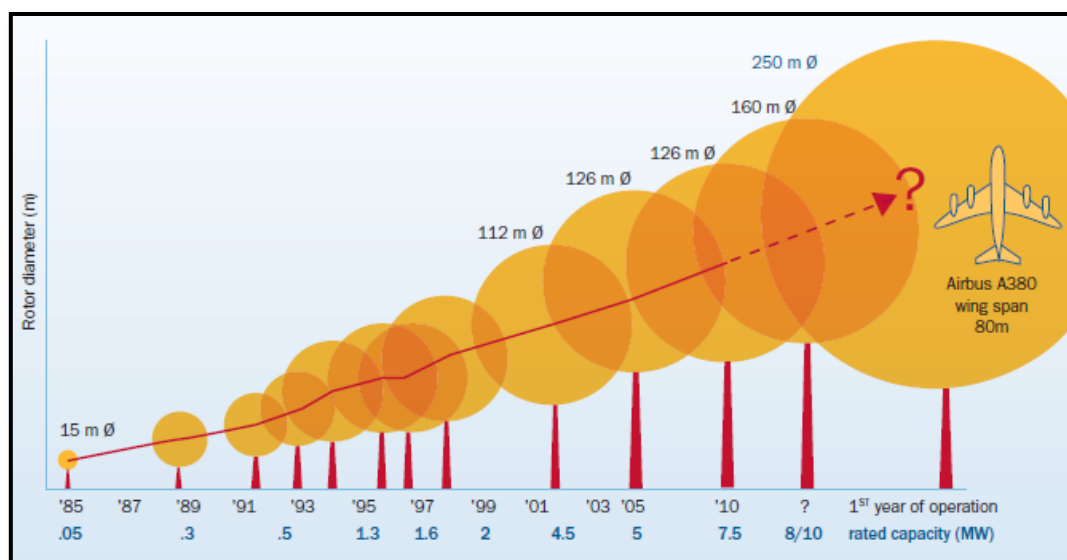


Figura 2.3 - Evolução do tamanho das turbinas eólicas ao longo dos anos [s37].

Em suma, apesar de a energia eólica ter sido alvo de críticas em sectores da opinião pública, seja pelo impacto visual dos parques eólicos, pelo ruído gerado, pelos custos de instalação e de manutenção, pela subsidiação necessária ao desenvolvimento e implementação desta fonte de produção de energia, nos dias de hoje a energia eólica constitui uma das renováveis de maior sucesso. Afirmando-se como alternativa credível à utilização de combustíveis fósseis, permitindo uma redução da quantidade de CO₂ emitido para a atmosfera, com a consequente mitigação do aquecimento global [3].

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) a nível mundial são cada vez mais abundantes, proporcionadas pela queima dos combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão), que por sua vez são assinalados como a principal causa pelo aquecimento global [s9, s10].

Na Tabela 2.1, referem-se as principais causas das emissões de dióxido de carbono [s11].

Tabela 2.1 - Causas das emissões de dióxido de carbono.

Dióxido de Carbono (CO₂)	Principais causas
	<ul style="list-style-type: none">✓ O CO₂ é libertado quando queimados ou explorados os combustíveis fósseis;✓ Responsável por cerca de 64% do efeito estufa;✓ Diariamente são enviados cerca de 6 mil milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera;✓ Tem um tempo de duração de 50 a 200 anos.

Para além dos inconvenientes referidos, os combustíveis fósseis são uma fonte limitada, pelo que é essencial recorrer-se a outras fontes de energia, que produzam zero ou baixas emissões de CO₂. A solução plausível para atenuar os danos causados na atmosfera é a substituição da energia produzida a partir de combustíveis fósseis, por fontes de energia mais limpas, minimizando a poluição e as alterações climáticas [s9].

É importante mencionar que as energias que não prejudicam o aquecimento global ou seja, as que não produzem dióxido de carbono, são as provenientes do vento, luz solar, água, plantas e calor geotérmico [s9].

Por fim, ao invés dos combustíveis fósseis, as fontes de combustíveis renováveis nunca irão esgotar-se, podendo vir a substituir completamente os combustíveis fósseis [s9].

2.2 Perspetiva no Mundo

O mercado da energia eólica no mundo tem sido alvo de competição pela liderança global, por parte da China e dos Estados Unidos. Em relação a América Latina, o Brasil lidera com 2,5 Gigawatts (GW) de capacidade total instalada [s12].

Atualmente, o crescimento da produção de energia elétrica, por via da energia eólica é já uma realidade mundial, como se pode observar na Figura 2.4 [s12].



Figura 2.4 - Crescimento do Parque Eólico Mundial, em 16 anos [s12] (GW).

Como ilustra a Figura 2.5, no ano de 2011, a indústria da energia eólica teve um crescimento de 21%, sendo instalada nesse ano uma capacidade de 41 GW, aumentando a capacidade geral instalada para 238 GW [4].

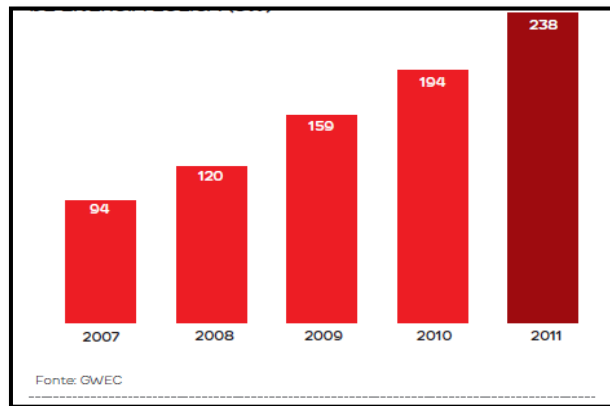


Figura 2.5 - Capacidade Mundial instalada de energia eólica (GW) [4].

Conforme ilustrado na Figura 2.6, a China e os Estados Unidos da América foram os maiores produtores de energia eólica no ano de 2011 [4].

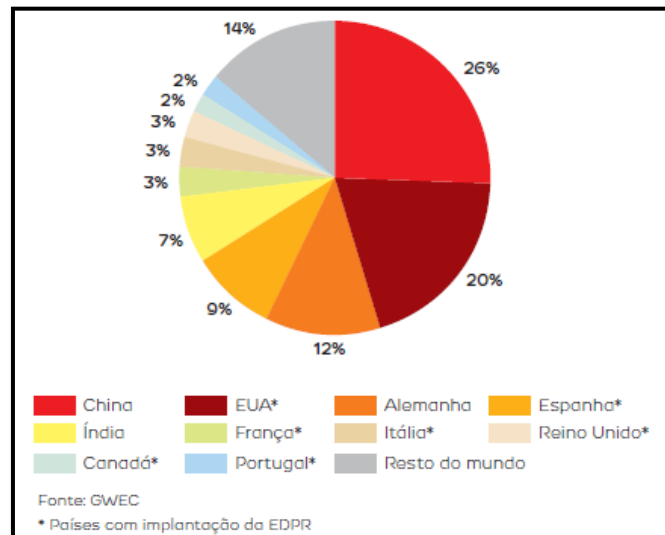


Figura 2.6 - Dez maiores mercados de produção de energia eólica no final de 2011 [4].

No ano de 2011, a China registou o seu maior crescimento até à data, acrescentando 18 GW à sua capacidade instalada, resultando uma capacidade total instalada de aproximadamente 63 GW [4].

De salientar que a Índia aumentou a sua capacidade para mais de 16 GW no ano de 2011, sendo o quinto maior mercado de energia eólica do mundo [4].

Em relação aos EUA, a potência instalada é inferior à da China, com um aumento de capacidade instalada no ano de 2011, de 6 810 MW, apresentando-se os Estados com o crescimento mais relevante [4]:

- ✓ O Estado da Califórnia – aumentou a sua capacidade de 921 MW;
- ✓ O Estado do Illinois – aumentou a sua capacidade de 693 MW;
- ✓ O Estado de Iowa- aumentou a sua capacidade de 647 MW;
- ✓ O Estado de Minnesota - aumentou a sua capacidade de 542 MW;
- ✓ O Estado do Texas - aumentou a sua capacidade de 292 MW.

Concluindo, como podemos ver na Figura 2.7, o cenário nos EUA atingia em 2011 uma capacidade total instalada de 46 919 MW [4].

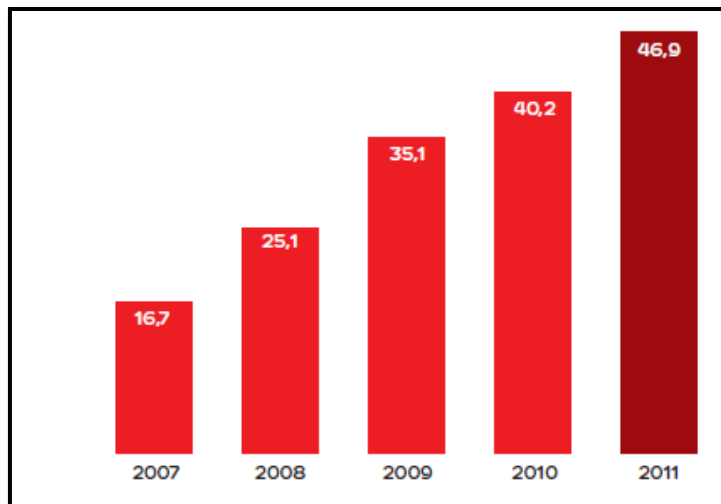


Figura 2.7 - Capacidade Eólica instalada nos EUA (GW) [4].

Na Figura 2.8 podemos analisar o crescimento de energia eólica por país, em Gigawatts, e percentualmente no crescimento global, constatar que a produção mundial acrescida foi de 44 GW [s12].



Figura 2.8 - Países com maior crescimento de energia eólica em 2012 [s12].

Como podemos analisar na Figura 2.9, Portugal é um dos países que se destaca no negócio eólico, com uma produção de capacidade eólica de 4,5 GW, no ano de 2012 [s12].



Figura 2.9 - Os 10 países com maior potência eólica instalada [s12].

2.3 Na Europa

No ano de 2012, de acordo com dados fornecidos pelo Eurostat, registou-se uma redução da quantidade de eletricidade produzida a nível da União Europeia, de cerca de 0.9%, em relação ao ano anterior. Este decréscimo pode explicar-se pela crise económica que assolou a Europa, sendo expectável que com a retoma da economia, pelo menos em alguns países europeus, se verifique um crescimento, embora menos significativo do que o ocorrido nos anos 80 [s13].

Na Tabela 2.2, são apresentados os valores em percentagem, da contribuição das diversas fontes de energia para a produção de eletricidade a nível europeu [s13].

Tabela 2.2 - Produção percentual de eletricidade por fontes [s13].

Produção de eletricidade, %			
Ano	2010	2011	2012
Térmica Convencional	54.8 %	54.3 %	52.3 %
Nuclear	27.3 %	27.6 %	27.1 %
Hidráulica	12.3 %	10.6 %	11.7 %
Eólica	4.6 %	5.7 %	6.4 %
Solar	0.7 %	1.5 %	-
Geotérmica	0.2 %	0.2 %	0.2 %
Outros	0.1 %	0.1 %	-

Como podemos constatar na Tabela 2.2, a produção de eletricidade através do recurso eólico tem aumentado, pouco, mas gradualmente ao longo destes últimos anos [s13].

Através da Figura 2.10, obtida dos relatórios do Eurostat, é possível analisar por percentagem, a distribuição da produção de eletricidade por fonte de energia em cada país da União Europeia [s13].

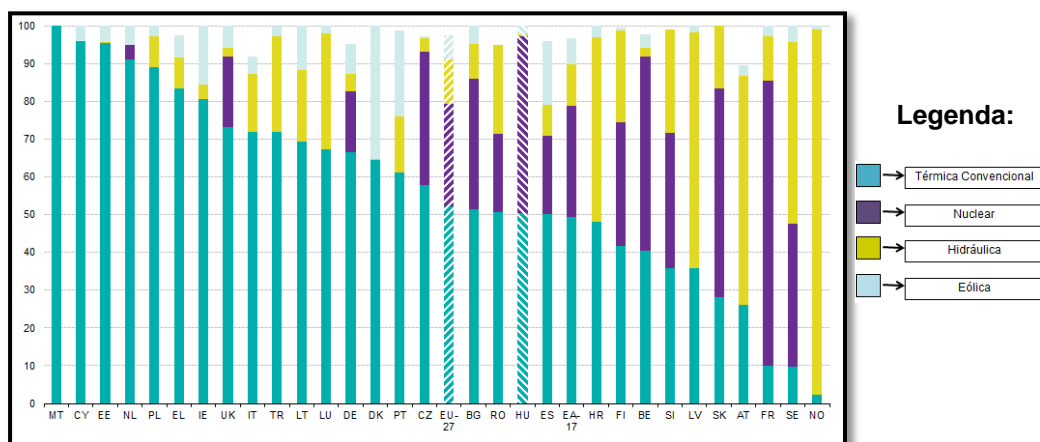


Figura 2.10 - Distribuição da produção de eletricidade por fonte, 2012 [s13].

A construção de parques eólicos, na Europa, tem crescido progressivamente ao longo dos anos [5].

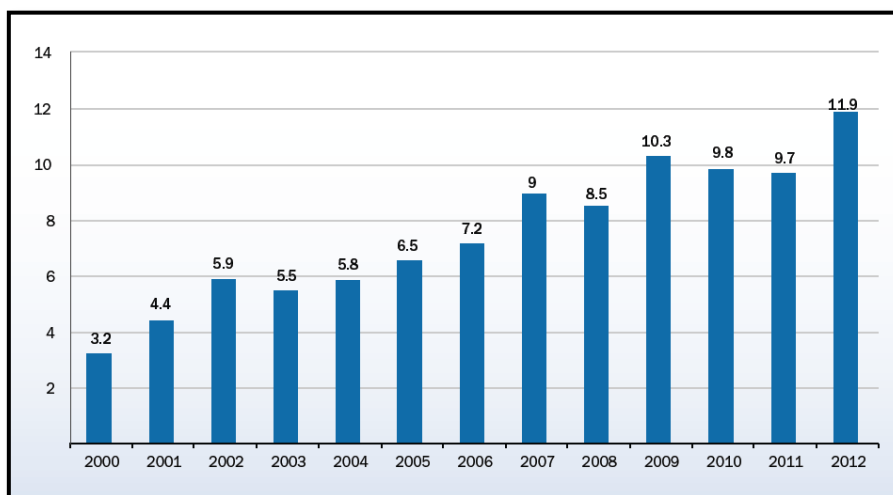


Figura 2.11 - Instalação anual de energia eólica na União Europeia, GW [5].

Como podemos observar na Figura 2.11, nos últimos 12 anos, a instalação de energia eólica, aumentou de 3,2 GW em 2000 para 11,9 GW em 2012 [5].

É importante referir que, desde 2000, foi instalada na União Europeia, 353 GW de energia adicional, em que, 28% corresponde a energia eólica [5].

Desde 2000 e até 2012, a energia eólica instalada no sector europeu, foi de 96,7 GW, para além de que, energias não renováveis, como o petróleo, carvão e nuclear, continuam a sofrer redução no mercado da energia, como se pode observar na Figura 2.12 [5]. No entanto o gás natural continua a revelar-se como a fonte de energia de maior expressão, na União Europeia.

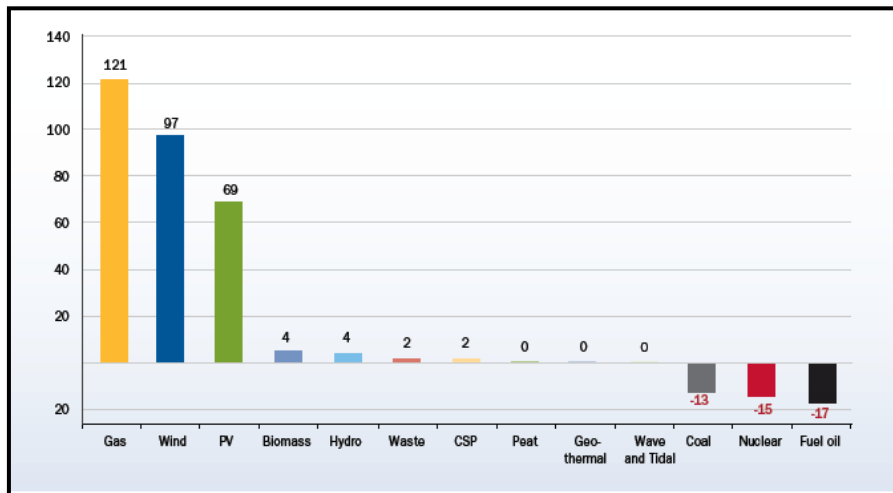


Figura 2.12 - Energia Elétrica gerada na União Europeia de 2000 a 2012 (GW) [5].

Como podemos observar na Figura 2.13, atualmente a UE, tem um acumulado de instalações para energia eólica, de 106 GW, sendo possível constatar que o crescimento é significativo, o que nos leva a concluir que a energia eólica é cada vez mais uma alternativa para a produção de energia [5].

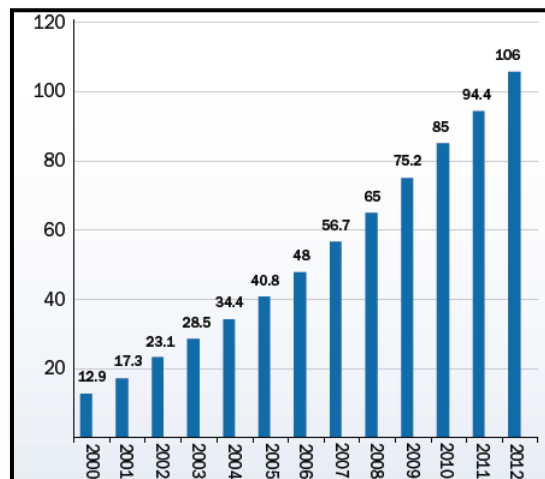


Figura 2.13 - Acumulado de energia eólica instalado na UE (GW) [5].

A Figura 2.14 representa o ranking da produção de energia eólica na Europa. Surgem a Alemanha e a Espanha com uma maior capacidade de produção de energia eólica, seguindo-se o Reino Unido, Itália e França e com 4% do total, situa-se Portugal.

GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION			
	End 2011	New 2012	Total (End of 2012)
EUROPE			
Germany	29,071	2,439	31,332
Spain	21,674	1,122	22,796
UK	6,556	1,897	8,445
Italy	6,878	1,273	8,144
France**	6,792	404	7,196
Portugal	4,379	145	4,525
Denmark	3,956	217	4,162
Sweden	2,899	846	3,745
Poland	1,616	880	2,497
Netherlands	2,272	119	2,391
Turkey	1,806	506	2,312
Romania	982	923	1,905
Greece	1,634	117	1,749
Ireland	1,614	125	1,738
Austria	1,084	296	1,378
Rest of Europe ⁽¹⁾	3,815	1,106	4,922
Total Europe	97,028	12,416	109,237
of which EU-27 ⁽¹⁾	94,337	11,566	105,696

Figura 2.14 - Capacidade global instalada de energia eólica (MW) [6].

2.4 Situação em Portugal

No ano de 1986, Portugal iniciou-se na produção de energia eólica, através da construção do primeiro parque eólico na ilha do Porto Santo, na Madeira. Em 1988, nos Açores, na ilha de Santa Maria, foi instalado outro parque eólico, denominado por Parque Eólico Figueiral. Já no ano de 1996, foi instalado o primeiro parque eólico no continente Português [s14, s15].

Como podemos observar na Figura 2.15 em 1996 a energia eólica começou a sua expansão, mas foi a partir do ano de 2002, que se registou um incremento significativo. Desde então, a implementação de um enquadramento legislativo específico e estável, conduziu a um crescimento muito rápido da energia eólica. O objetivo era atingir em 2011, 4000 MW instalados, ou seja, uma potência correspondente a aproximadamente 15% da eletricidade consumida em Portugal [s16].

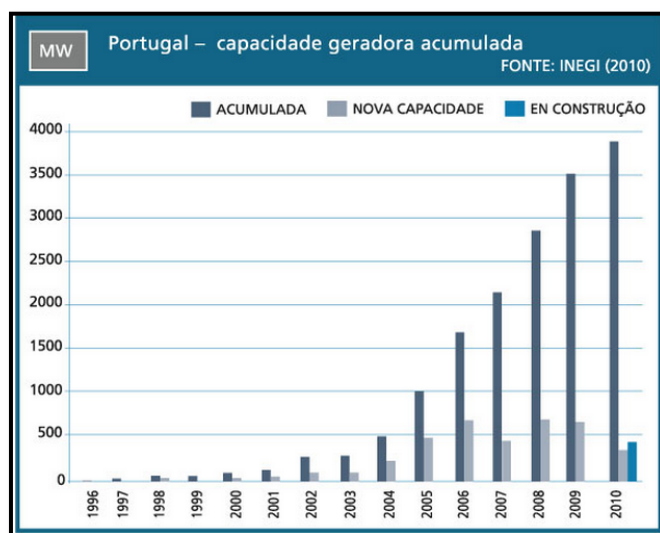


Figura 2.15 - Capacidade geradora acumulada em Portugal (2010) [s16].

Seguida e resumidamente, apresenta-se a evolução da potência eólica instalada em Portugal [s14, s17]:

- ✓ 2001- 16 Parques eólicos, 173 aerogeradores, potência instalada de aproximadamente 114 MW;
- ✓ 2004- 71 Parques eólicos, 441 aerogeradores, potência instalada de aproximadamente 537 MW;
- ✓ 2007- Portugal era o décimo produtor mundial em termos absolutos, tinha uma potência instalada de aproximadamente 2150 MW;
- ✓ 2008- 164 Parques eólicos, 1427 aerogeradores, potencia instalada de aproximadamente 2672 MW;
- ✓ 2009- 191 Parques eólicos, 1826 aerogeradores, potencia instalada de aproximadamente 3430 MW;
- ✓ 2010- Portugal ocupa o sexto lugar, no ranking europeu e o nono no mundial de potência instalada de aproximadamente 3535 MW;
- ✓ 2011- 206 Parques eólicos, potência instalada era de aproximadamente 4000 MW;
- ✓ 2012- Portugal ficou na décima posição a nível mundial, potência instalada de aproximadamente 4398 MW.

Atualmente, Portugal continental, possui 217 parques eólicos industriais em funcionamento, 6 na Região Autónoma dos Açores e 10 na Região Autónoma da Madeira, conforme se pode observar na Figura 2.16 [s15].

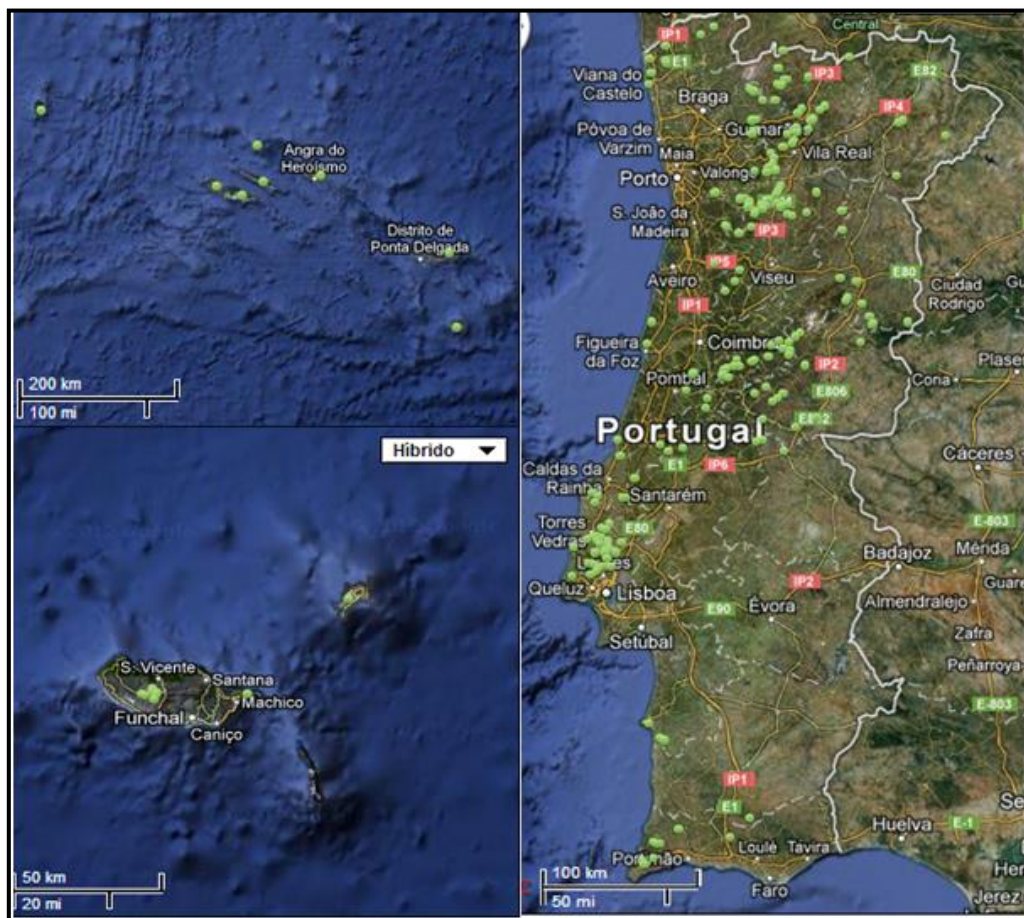


Figura 2.16 - Localização dos Parques Eólicos em Portugal [s15].

2.5 Contribuição da empresa EDP - Energias de Portugal, para a expansão da energia eólica

No ano de 1976, foi fundada a EDP, através da junção de 13 empresas que tinham sido nacionalizadas no ano de 1975. A produção, transporte e distribuição da eletricidade do país, ficou ao cargo da EDP, que para além disso, também tinha a responsabilidade da modernização e ampliação das redes de distribuição elétrica, do planeamento e da construção do parque electroprodutor nacional, e também, do estabelecimento de um único tarifário para todos os clientes [s18, s19].

A internacionalização da empresa deu-se no ano de 1996, como consequência da necessidade do seu crescimento [s20].

Atualmente, em Portugal, o grupo EDP, através da sua subsidiária EDP Renováveis, possui 35 parques eólicos, com capacidade instalada total de 939 MW, como demonstra a Figura 2.17. Prevê-se que em 2013, a capacidade instalada seja de 1100 MW [s21].

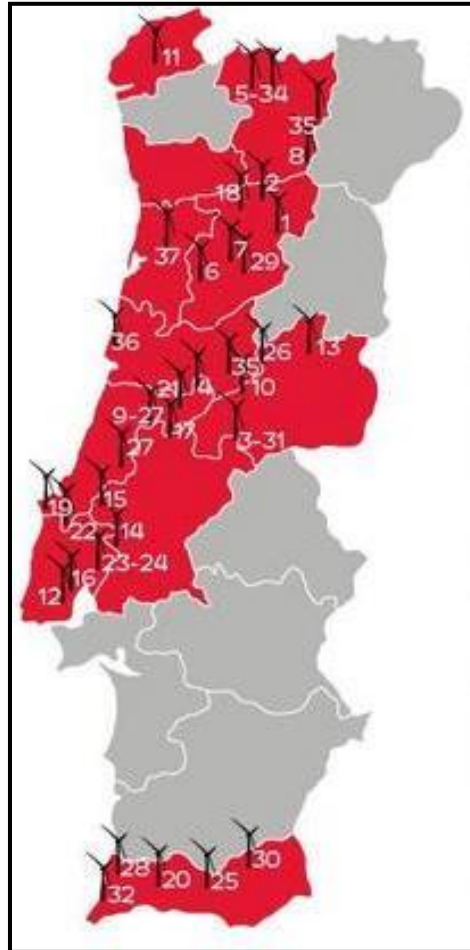


Figura 2.17-Parques eólicos da EDP, em Portugal [s22].

Segundo a Ethisphere, a EDP tem sido reconhecida pelos melhores motivos, nomeadamente, pelo segundo ano consecutivo integrar o ranking internacional das empresas mais éticas do mundo “ The World’s Most Ethical Companies – WME”. O seu reconhecimento internacional deve-se à adoção de boas práticas de sustentabilidade e ética em todas as suas áreas de negócio e ao contributo que tem dado em toda a sua cadeia de valor e à sociedade em geral, promovendo a partilha de valores de integridade, responsabilidade e transparência [s23].

Adicionalmente e ainda no domínio da sustentabilidade, a EDP ganhou pelo 3º ano consecutivo o prémio Dow Jones de elétrica mundial mais sustentável, em grande

parte devido a sua contribuição para a geração de energia verde – a energia eólica [s23].

Interessará ainda referir que Portugal, através da EDP Renováveis está numa posição de destaque mundial (2ª posição para uma empresa com sede europeia) se se somarem as potências eólicas dos seus parques em Portugal, Espanha, França, Bélgica, Polónia, Roménia, Brasil, EUA e Canadá, Figura 2.18.



Figura 2.18-EDP Renováveis no Mundo, 2011 [7].

3 Caracterização do local para a implementação de um Parque Eólico Industrial

A caracterização do local antes da implementação de um parque eólico industrial deve seguir uma ordem de caracterização objetiva. Neste contexto, apresenta-se neste capítulo seguidamente: a escolha da localização do parque eólico (subcapítulo 3.1); o estudo do regime de ventos (subcapítulo 3.2); o estudo geológico-geotécnico (subcapítulo 3.3); a caracterização dos acessos ao parque (subcapítulo 3.4); e a análise de possíveis obras de engenharia que devam ser consideradas (subcapítulo 3.5).

3.1 Escolha da localização do Parque Eólico

Numa primeira etapa é primordial identificar o terreno onde se pretende construir o parque eólico. A identificação passa por um reconhecimento do terreno, nomeadamente, se é um terreno útil para o parque eólico, saber a disposição do regime de ventos e avaliar a capacidade resistente do terreno [s24].

A escolha de locais potencialmente adequados à construção de um parque eólico, passa por seguir algumas regras, nomeadamente, o topo das montanhas serem locais onde sopra o vento, os vales serem locais com menor intensidade de vento, apesar de por vezes existirem efeitos de concentração local, e por último, as zonas costeiras, os planaltos e as planícies elevadas serem locais ventosos [1].

As zonas mais propícias à construção do parque eólico podem ser identificadas a partir de mapas adequados e com ajuda de visitas aos locais. Os mapas de isoventos, caso existam, são utilizados para uma primeira estimativa do recurso eólico. Ainda assim, é essencial uma caracterização pormenorizada, recorrendo a dados obtidos a partir de medições efetuadas no local [1].

Por fim, para que seja possível a produção de energia eólica, é preponderante que o local possua alguns requisitos, tais como [s24]:

- ✓ Capacidade de ligação à rede de distribuição de energia elétrica, de forma económica;
- ✓ Ventos com regimes e velocidade média que permitam a obtenção de rentabilidade adequada;

- ✓ Condições orográficas e morfológicas não perturbadoras.

3.2 Estudo do regime de ventos e do seu potencial eólico

3.2.1 Regime de ventos

O estudo do regime de ventos é realizado a partir de medições efetuadas em vários pontos da região em estudo, num período de entre dois a três anos [8].

O estudo dos ventos na zona envolvente requer uma análise, no que diz respeito à geografia do local, mais precisamente quanto à estrutura do terreno, rugosidade da superfície e obstáculos [2].

No que se refere à rugosidade do terreno, quanto mais acentuada for a rugosidade, maior será o abrandamento do vento. A análise das condições de vento num local é realizada a partir de um parâmetro, designado por classe de rugosidade ou comprimento de rugosidade, em que, para uma região com muitas árvores e obstáculos (edifícios, por exemplo), considerada uma zona com alta rugosidade, é atribuída uma classe de 3 ou 4, enquanto para a superfície do mar a rugosidade é 0 [9].

Na Figura 3.1, observa-se que em zona urbana consegue-se uma velocidade de vento de por exemplo 45 m/s para uma altura do solo de aproximadamente 475 m, enquanto em zona rústica com menor número de obstáculos essa velocidade é atingida para uma altura de 375 m e na zona costeira, livre de obstáculos, consegue-se a mesma velocidade de vento para uma altura de 300 m.

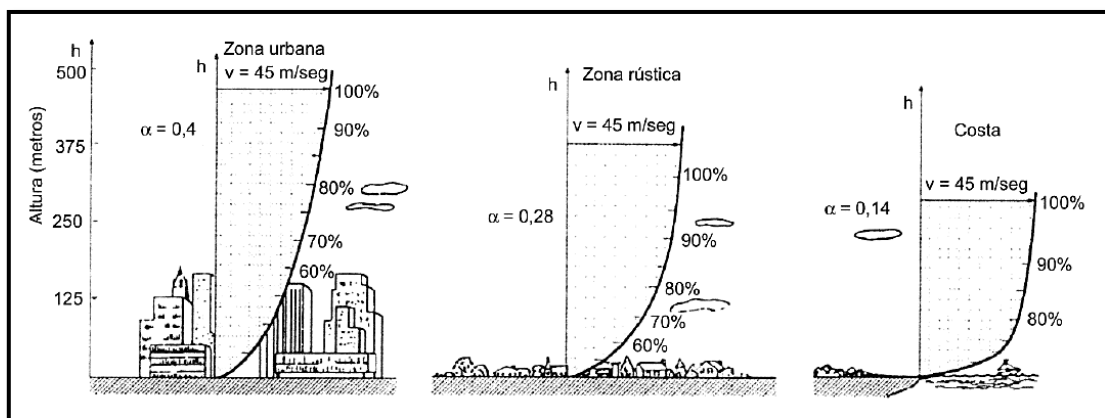


Figura 3.1 - Variação da velocidade do vento com a altura [9].

Relativamente aos obstáculos é relevante registar com precisão as linhas de arvoredo, edifícios ou outras turbinas eólicas. No que diz respeito aos obstáculos naturais é importante saber qual o tipo de obstáculo, sua localização e dimensões [2].

Os obstáculos que podemos encontrar, como por exemplo, árvores, edifícios, formações rochosas etc., afetam negativamente o vento, diminuindo a sua velocidade significativamente, para além de muitas vezes criarem turbulência em torno deles próprios [9].

Sendo assim, os fabricantes e projetistas quando calculam a produção de energia de um aerogerador, têm em atenção os obstáculos existentes a menos de um quilómetro em qualquer das direções mais importantes do vento que vai fazer girar a turbina eólica [9].

Para fazer as medições das características do vento na zona em estudo, são colocadas no local, por norma, pelo menos duas torres de medição (torres meteorológicas), localizadas no início e no fim do parque. É essencial colocar estas torres meteorológicas tal que reproduzam as condições de funcionamento do futuro parque eólico [2].

As torres de medição denominadas torres meteorológicas, são torres metálicas treliçadas e atirantadas, pintadas de vermelho e branco, (alerta de sinalização), como podemos ver na Figura 3.2, possuem sinalização luminosa de alerta à navegação aérea, são equipadas com painéis solares e respetivas baterias, para além de um painel de controlo para recolha de dados e um sistema transmissor de dados por rádio ou satélite [2].



Figura 3.2 - Torre meteorológica [64].

As torres meteorológicas deverão ser dotadas de [2]:

- ✓ Anemómetros (dois por torre, para ser verificada a credibilidade das leituras realizadas);
- ✓ Cata-vento (um por torre, para determinar a direção do vento);
- ✓ Sensor de pressão atmosférica (já que a produção de energia eólica também varia com a pressão atmosférica);
- ✓ Sensor de temperatura (para verificar a existência de temperaturas extremas).

A medição do vento é realizada com o auxílio de anemómetros e sensores de direção (cata-vento) [8].

No que concerne aos anemómetros, servem para determinar se o vento sopra com velocidade suficiente para colocar o rotor a trabalhar contra o vento, já os sensores de direção indicar-nos-ão a direção do vento, com o intuito de orientar o rotor do aerogerador [9].

Os instrumentos deverão estar dirigidos para todas as direções do vento e a uma distância dos obstáculos de no mínimo dez vezes a sua altura [66]. A posição mais correta para os instrumentos é exatamente no local onde se irá situar o rotor do aerogerador, para permitir relacionar os dados recolhidos com registos já existentes em estações meteorológicas limítrofes, ou para determinar o comprimento característico da rugosidade do solo [8].

No que se refere a anemómetros, existem vários modelos, sendo o mais comum o anemómetro de conchas, de Robinson, Figura 3.3, em que a rotação das conchas é proporcional à velocidade do vento [9].



Figura 3.3 - Anemómetro de conchas de Robinson [s25].

Os dados são recolhidos num registador de dados, em que as medições recolhidas são transmitidas a cada 10 minutos, para que seja compatível com a maioria de programas de cálculo existentes no mercado [9].

Por fim, os dados são estudados por institutos independentes, em conjunto com a altimetria (determinada com ajuda de programas de simulação em 3D), estudos no local sobre a rugosidade do terreno, e *software* com mapas de ventos, com o objetivo de caracterizar a potencialidade eólica da zona envolvente [2].

3.2.2 Potencial Eólico

A velocidade do vento que atravessa uma turbina é um fator determinante para o cálculo do Potencial Eólico. Consequentemente, o aproveitamento deste recurso depende da intensidade e da direção do vento [s26].

A fórmula para o cálculo da potência eólica é deduzida a partir da equação de potência total de um fluxo de ar (P_{tot}), onde temos [10]:

$$P_{tot} = m \times E_c \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que:

- ✓ P_{tot} - é diretamente proporcional à sua energia cinética E_c ;
- ✓ m - representa o caudal mássico.

Seguidamente, substituímos a equação da energia cinética (E_c) e da conversão da massa (m), na fórmula da potência eólica, obtendo-se:

$$E_c = \frac{1}{2}V^2 \quad e \quad m = \rho AV \quad \longrightarrow \quad P = \rho AV \frac{1}{2}V^2 \quad \longrightarrow \quad P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Sendo que [69]:

- ✓ P – potência do vento medida em Watt, (W);
- ✓ V – velocidade do vento medida em metros por segundo, (m/s);
- ✓ A – área circular (πr^2 , em que o r é o raio do rotor medido em metros) do rotor da turbina (m^2);
- ✓ ρ – densidade do ar seco $\rho = 1,225 \text{ Kg}/m^3$, em condições de pressão e temperatura normais.

Contudo, segundo o físico Albert Betz, nenhuma turbina pode converter na totalidade a energia cinética do vento em energia mecânica, porque o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula. Sendo assim, a partir da aplicação de conceitos de mecânica de fluidos, a eficiência máxima teórica de qualquer turbina eólica é de 0.59, conhecido por Limite de Betz, que é geralmente denominado por “coeficiente de potência”, C_p [11, 1].

Logo, o coeficiente de potência deve constar na equação da energia, sendo assim a equação final para o cálculo do potencial eólico é [11]:

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_p \quad (\text{Eq. 3.3})$$

3.3 Estudo geológico-geotécnico

O estudo geológico-geotécnico de uma zona é determinante para a construção de um parque eólico. Este estudo é realizado antes da execução do projeto, e insere-se na recolha de dados na fase de apoio à decisão de se avançar com os projetos de execução das infraestruturas do parque. Tem como finalidade determinar as características do solo, com o propósito de que as infraestruturas sejam executadas corretamente relativamente à sua interação com o solo, avaliar custos e assim garantir segurança e rentabilidade económica [12].

Ao realizarmos o estudo geológico-geotécnico, pretende-se conhecer os seguintes parâmetros [12]:

1. Diferentes tipos de litologia que constituem o subsolo, mais propriamente nas áreas onde irão ser executadas as infraestruturas de engenharia civil;
2. Identificar e dividir por grau de risco, os vários riscos geológicos:
 - a. Solos brandos;
 - b. Encostas instáveis;
 - c. Áreas sujeitadas a inundações;
 - d. Áreas com cavidades naturais;
 - e. Túneis escavados.
3. Relativamente às camadas encontradas:
 - a. Identificar geologicamente as camadas;
 - b. Determinar as características geológicas, as propriedades relativas ao seu estado e os parâmetros relativamente à elasticidade e resistência;
4. Identificar a presença de lençóis freáticos, em profundidades que podem prejudicar a construção nas zonas em estudo;
5. Para a criação de infraestruturas de drenagem, é essencial determinar a hidrologia e hidrogeologia da área;
6. Determinar as características de resistência dos materiais que constituem o subsolo, com o intuito de definir processos de execução dos trabalhos em subsolo;
7. Fixar critérios de estabilidade para as várias situações proporcionadas pelo movimento de terras;
8. Determinar se será exequível a execução de aterros com materiais da zona em estudo para as infraestruturas que necessitem de regularização;
9. Por último, com base nos dados definidos anteriormente, deve-se estabelecer critérios sobre as condições de fundação e as precauções que devem ser tomadas para prevenir a ocorrência de instabilidade dos solos.

Como guião geral para a realização do estudo geológico-geotécnico, apresenta-se seguidamente um plano que pode ser utilizado, adaptando-se consoante o caso específico a estudar [12]:

1. Localizar a área de estudo e descrever o parque eólico;
2. Conhecer a história geológica da zona envolvente e indicar a experiência em obras geotécnicas;
3. Analisar a contaminação ambiental por forma a verificar seu impacto sobre as estruturas de aço e de betão;
4. Descrever os trabalhos de investigação geotécnica elaborados:

- 4.1 - Verificar a geologia da superfície;
- 4.2 - Poços de observação geotécnica;
- 4.3 - Perfuração Rotary;
- 4.4 - Testes de penetração dinâmicos;
- 4.5 - Testes geofísicos: sísmica de refração e resistividade elétrica;
- 4.6 - Outros testes: ensaios de carga com placa, ensaios de penetração estática, ensaios do cone de Abrams;
- 4.7 - Exames laboratoriais, necessários para a litologia e condições geotécnicas. Os mais comuns são:
 - 4.7.1 - Análise granulométrica;
 - 4.7.2 - Limite de consistência;
 - 4.7.3 - Compressão simples;
 - 4.7.4 - Ensaio edométrico;
 - 4.7.5 - Testes de corte puro;
 - 4.7.6 - Testes de rutura do solo;
 - 4.7.7 - Aumento do volume edométrico;
 - 4.7.8 - Máxima pressão do aumento de volume;
 - 4.7.9 - Teor de sulfato solúvel do solo;
 - 4.7.10 - Grau de acidez Baumann-Gully;
 - 4.7.11 - Conteúdo em matéria orgânica;
 - 4.7.12 - Conteúdo em sais solúveis;
 - 4.7.13 - Ensaio de compactação do tipo Proctor normal;
 - 4.7.14 - Ensaio de compactação do tipo Proctor modificado;
 - 4.7.15 - Índice de CBR;
 - 4.7.16 - Análise da agressividade da água no betão;
- 5. Características geológicas-geotécnicas:
 - 5.1 - Descrever a geologia geral da zona envolvente;
 - 5.2 - Descrever a litologia e as características geotécnicas, com base em poços de orientação geotécnica, através de uma perfuração rotativa. Compilar mapas geológicos-geotécnicos à escala de 1:5000, com divisão das respetivas litologias e por fim descrever as características de cada uma das litologias e classificá-las de acordo com o sistema de solo unificado;
 - 5.3 - Analisar a estabilidade da superfície e a probabilidade de erosão, bem como outros riscos geológicos;

- 5.4 - Caracterizar a resistência mecânica dos materiais, com base em amostras inalteradas, ensaios de compressão simples e de penetração;
- 5.5 - Analisar a expansividade;
- 5.6 - Analisar a agressividade química através de testes de grau de acidez e de teor de sulfato;
- 5.7 - Descrever a hidrologia e hidrogeologia da zona e determinar a existência de lençol freático e as suas variações sazonais;
- 5.8 - Estudar a atividade sísmica existente na área;
6. Recomendações para o projeto e construção das infraestruturas civis do parque eólico:
 - 6.1 - Saber as condições para a inclinação e estabilidade da escavação;
 - 6.2 - Avaliar a possibilidade da utilização dos materiais de escavação;
 - 6.3 - Recomendações para o projeto e construção de áreas niveladas;
 - 6.4 - Recomendações para o projeto e construção das fundações para turbinas eólicas;
 - 6.5 - Recomendações para o projeto e construção das fundações da plataforma da subestação, e dos edifícios auxiliares;
 - 6.6 - Recomendações para o projeto e construção de estradas e acessos;
 - 6.7 - Recomendações para o projeto e construção de valas das linhas de comunicação e de cablagem de potência no subsolo;
 - 6.8 - Medição da resistividade do solo para as instalações de condutores de ligação à terra;
7. Localização e análise da possível utilização de materiais de pedreiras na vizinhança;
8. Registo de todos os testes e ensaios realizados, tais como:
 - 8.1 - Mapeamento geológico-geotécnico e um plano do local para trabalhos realizados em campo;
 - 8.2 - Poços de observação geotécnica;
 - 8.3 - Sondagens;
 - 8.4 - Testes de penetração;
 - 8.5 - Testes de laboratório;
 - 8.6 - Medições de resistividade elétrica;
 - 8.7 - Testes geofísicos, como: sísmica de refração, resistividade elétrica, georadar;
9. Detalhar os cálculos das secções acima transcritas.

Para além do plano apresentado anteriormente, é também preponderante a avaliação dos seguintes requisitos para a elaboração do estudo geológico-geotécnico [12]:

- a) Os encarregados pelo estudo geológico-geotécnico devem ser qualificados e registados como técnicos, com conhecimentos e experiência comprovada, devendo estar devidamente identificados em toda a documentação produzida;
- b) Os poços de observação geotécnica devem ser executados no local de cada turbina eólica;
- c) Nos locais das turbinas eólicas deve ser realizado pelo menos um teste de penetração dinâmica, exceto no caso de o terreno ser rochoso no qual o nível de recuperação é imediata;
- d) Os ensaios deverão ser realizados numa ordem crescente de importância, iniciando-se com os testes de observação geotécnica e testes de penetração dinâmica, seguindo-se os testes geofísicos e por fim sondagens. Pelo menos uma sondagem deve ser realizada para caracterizar a litologia homogénea, e os sectores geotécnicos de modo a caracterizar todas as situações que são suscetíveis de serem encontradas na construção do parque eólico. Se a distribuição das condições é relevante, o número de sondagens deve ser aumentado, em geral as sondagens necessárias são no mínimo de 15% das posições, se necessário poder-se-á atingir 100%;
- e) Nas sondagens e nos testes de penetração a precisão da georreferência é de pelo menos 1m;
- f) Para calibrar os testes de penetração de acordo com os estratos encontrados nas sondagens, é recomendável a execução de um teste de penetração próximo de onde as sondagens foram executadas, para cada tipo de estratigrafia encontrada;
- g) O trabalho que envolve sondagens e testes de penetração deverá ser supervisionado por técnicos qualificados e experientes, devendo os seus nomes constar no registo de cada teste;
- h) Se a capacidade de resistência do solo for reduzida é requerida a execução de fundações profundas, e os testes de penetração e sondagens irão ser realizados a uma profundidade superior que a indicada para estas fundações;
- i) O técnico responsável pelo estudo irá decidir, de acordo com os dados registados, se será necessário a realização de mais sondagens e testes, como também irá indicar onde irão ser realizados;

- j) No caso de ser necessário o estudo de grandes áreas, o responsável pelo estudo geológico-geotécnico irá decidir se as técnicas de prospeção geofísicas, tais como a refração sísmica ou a resistividade elétrica podem ser utilizadas com finalidade de adquirir informação adicional para ajudar na distribuição dos pontos de verificação, assim como a profundidade necessária para cada um deles;
- k) Perante um solo rochoso, onde exista dificuldade na execução de testes de penetração, ou no acesso dos equipamentos de sondagens, ou o solo apresente áreas cársticas ou também cavidades, devem ser utilizados métodos de testes geofísicos, tais como: a refração sísmica, resistividade elétrica, georadar ou microgravimetria;
- l) Os testes de campo e de laboratório realizados devem cumprir todos os regulamentos vigentes, e em cada um dos testes deve ser elaborado um relatório sobre o estudo geológico-geotécnico;
- m) Deve ser analisada a sensibilidade do solo abaixo das turbinas eólicas, a partir das variações nas suas propriedades geológico-geotécnicas em relação às cargas, que variam com o tempo;
- n) No relatório do estudo geológico-geotécnico deve constar o equipamento utilizado para executar os testes e as sondagens, quem utilizou e as datas em que foram realizados;
- o) O nível freático é identificado a partir de um tubo, em conjunto com avaliação hidrológica geral da zona, e pelo acompanhamento do nível dos tubos em diferentes épocas do ano, com intuito de determinar oscilações possíveis do nível do lençol freático;
- p) Mesmo que se conclua que o nível do lençol freático não causará problemas na obra, devem ser produzidas recomendações sobre os procedimentos para a execução do sistema de drenagem das fundações das turbinas eólicas;
- q) Na superfície das fundações, a área de influência do solo é definida pela pressão. As sondagens e os testes de penetração devem cobrir essa área com uma profundidade no âmbito da fundação da superfície de apoio de 1,5 a 2,0 vezes a largura típica das fundações, em caso de a fundação ser homogênea as condições são detetadas antes da profundidade indicada;
- r) É indispensável que os principais indicadores geotécnicos sejam realizados a partir de testes *insitu* ou testes laboratoriais. As correlações são apenas utilizadas onde for absolutamente necessário e após uma justificação no relatório sobre o estudo geológico-geotécnico;

- s) Todos os cálculos geotécnicos devem ser apresentados detalhadamente, indicando a metodologia e a formulação utilizada. Os dados cadastrais extraídos dos testes e sondagens, deverão constar no relatório sobre o estudo geológico-geotécnico;
- t) No relatório sobre o estudo geológico-geotécnico, deverá ser incluída uma reportagem fotográfica sobre o trabalho de campo;
- u) Por último, caso o técnico responsável chegue à conclusão que é necessário atualizar o estudo com informações que surjam no decurso da obra, será incluído no relatório um capítulo, indicando quais os parâmetros que deverão ser objeto de verificação futura e como deve ser obtida a informação técnica respetiva.

Finalmente, indica-se a sequência de ações a realizar, após ser definido o adjudicatário do estudo geológico-geotécnico [12]:

- 1. Reunião com a empresa de geotecnia que venceu o concurso e com a qual se celebrou contrato;
- 2. Realização das tarefas necessárias para a obra:
 - 2.1 Verificação do solo e planta para o posicionamento das infraestruturas;
 - 2.2 Testes de campo e sondagens;
 - 2.3 Testes de laboratório;
 - 2.4 Trabalho de escritório e compilação do relatório sobre o estudo geológico-geotécnico;
 - 2.5 Entrega do relatório sobre o estudo geológico-geotécnico.

3.4 Caracterização dos acessos ao parque

3.4.1 Acessos e Vias

Os acessos e as vias para aceder ao parque são essenciais para o transporte dos materiais, equipamentos e aerogeradores [9].

Sendo assim, é primordial ter em conta os seguintes parâmetros [9]:

- ✓ Tráfego do local;
- ✓ Barreiras e rotas de viagem;
- ✓ Largura da estrada;
- ✓ Margem de segurança;
- ✓ Superfície da estrada;

- ✓ Capacidade de suporte.

Normalmente os parques situam-se em zonas montanhosas, em que as estradas são tortuosas e dispendo de curvas com pequenos raios de curvatura, dificultando o transporte dos equipamentos e das máquinas. Para contornar essas dificuldades, algumas estradas podem ter de sofrer alterações por forma a satisfazer os requisitos. Algumas dessas mudanças podem passar pela alteração do traçado das estradas existentes, ou a execução de novas vias de acesso [9].

Para evitar a construção de novas estradas, sempre que possível são utilizadas as existentes, alterando-as se necessário, o que permite minimizar custos, reduzir o tempo de execução do parque e evitar danos ao meio ambiente. As alterações às vias existentes são executadas tendo em atenção os seguintes aspetos, de acordo com as dimensões dos equipamentos dos atuais parques eólicos [9]:

1. Os transportes têm comprimentos entre 25 a 35 metros;
2. As torres estão divididas em troços, que podem medir entre 20 a 30 metros;
3. A pá, apesar de depender da potência do aerogerador, poderá medir entre 20 a 30 metros, embora nos últimos modelos, possa atingir 60 metros;

Em suma, as vias de acesso e as vias internas do parque eólico, necessitam de um raio de curvatura entre 20 a 35 metros (Figura 3.4), para além de uma inclinação moderada, podendo atingir excepcionalmente o valor máximo de 12% [9].

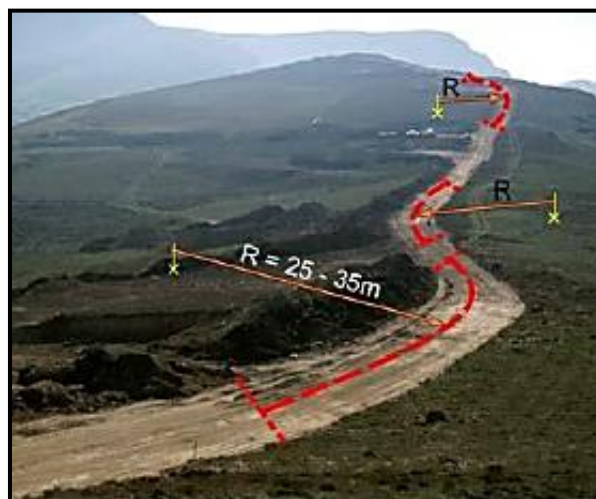


Figura 3.4 - Raio de curvatura para as vias [9].

3.4.2 Parâmetros a considerar nas rodovias

3.4.2.1 Peso

O peso que as vias podem suportar é um parâmetro relevante, dada a necessidade de transporte não só do aerogerador como também da maquinaria pesada. A composição do solo firme é determinada pela carga máxima que deve suportar, isto é, a partir do peso da grua que irá ser utilizada para a montagem. Para garantir que o solo suporta as cargas da passagem da grua, sem rutura, é imprescindível a realização de um estudo geológico/geotécnico [9].

Em geral, o tratamento do solo das vias interiores do parque necessita de consolidação, com introdução de camadas de *tout venant*, seguindo-se camadas de gravilha, com uma espessura total de aproximadamente 25 a 30 cm. As camadas devem ser devidamente compactadas à custa de rega e passagem de cilindro compactador (para redução do índice de vazios do solo) até se atingir um CBR de 95 a 98. No caso de solos plásticos, pode ter de se remover a camada argilosa e/ou introduzir terras de empréstimo, para se garantir grau de compactação adequado [9].

3.4.2.2 Drenagem

O sistema de drenagem nas vias é importante para escoar as águas pluviais. Relativamente às rodovias, é habitual a execução de valas na zona lateral da rodovia, utilizando-se tubos de betão de vários diâmetros, calculados adequadamente e caixas de recolha e de saída das águas pluviais [9].

3.4.2.3 Rasante

Uma possível alteração na rasante deve ser executada com precaução para evitar futuros transtornos durante o transporte. É necessário evitar mudanças bruscas na rasante para [9]:

- ✓ Evitar que as gruas fiquem sem tração às mesmas;
- ✓ No transporte da torre e das pás, por serem objetos de grande dimensão, ficam em suspensão fora do camião, podendo chegar aos 10 metros, sendo essencial o estudo da rasante para prevenir que esses objetos toquem na via.

3.4.3 Trabalhos a realizar nos acessos e nas plataformas de montagem

Antes da execução de qualquer tarefa, é essencial que haja um tratamento tanto nas vias (Figura 3.6), como no local de instalação da plataforma de montagem da torre (Figura 3.5) e do aerogerador [2]:

- ✓ Nas áreas de intervenção, incluindo as zonas de carga, transporte e descarga, tem de haver a desmatção e remoção da camada superficial numa profundidade de cerca de 20 cm, podendo ser necessário intervir numa profundidade superior, dependendo da espessura da camada vegetal;
- ✓ Execução de escavações e aterros necessários para a infraestrutura rodoviária;
- ✓ Para a drenagem de águas pluviais a construção de aquedutos incluindo rede de tubagem, caixas de recolha e bocas de saída;
- ✓ O fundo das caixas de recolha e das valetas deve apresentar uma compactação a 95% do ensaio de Proctor modificado;
- ✓ Aplicação de camadas de sub-base e base em agregado britado de granulometria extensa com espessura de 25 cm, incluindo nas valetas quando necessário;
- ✓ Ensaibramento com rega e na camada final compactação a 98 % do ensaio de Proctor;
- ✓ Construção de valeta em betão nos sítios adequados e caso o EIA (estudo de impacto ambiental) autorize;

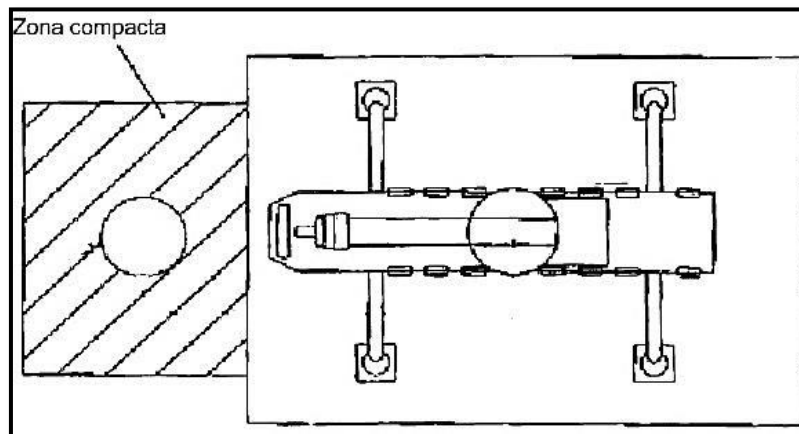


Figura 3.5 - Exemplo de uma plataforma de montagem [9].

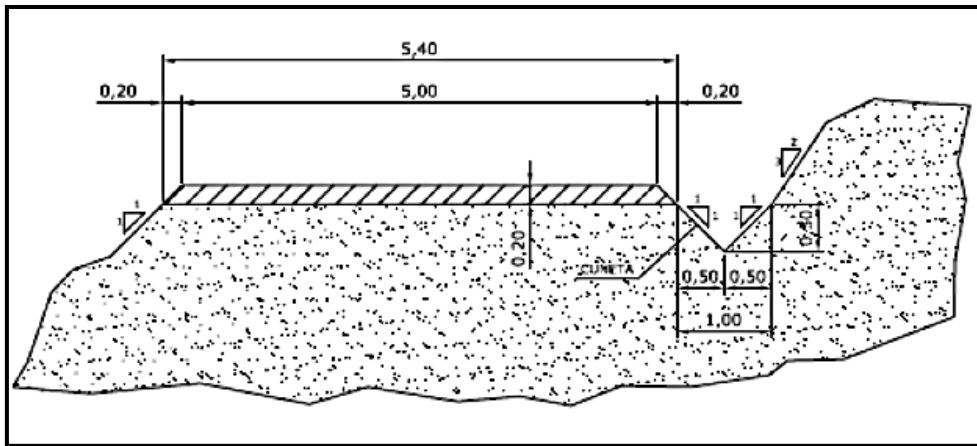


Figura 3.6 - Perfil transversal tipo da via de acesso [9].

3.5 Obra de engenharia civil

3.5.1 Plataformas

As plataformas têm como função auxiliar as guas permitindo-lhes um correto apoio para a montagem da turbina eólica. Geralmente, possuem uma superfície bem compactada com uma sub-base resistente. As dimensões destinadas à plataforma dependem do tipo de grua a utilizar (Figura 3.7), que por sua vez depende da turbina eólica que irá ser montada e do peso dos diferentes componentes da turbina eólica [9].



Figura 3.7 - Exemplo da grua utilizado para a plataforma [s35].

3.5.1.1 Regras para a implantação das plataformas

No caso de a grua estar mais acima da cota do anel da fundação irá facilitar a montagem em contrapartida irá existir um desnível, se a grua estiver situada abaixo do anel de fundação a grua poderá não ter força suficiente para a montagem da turbina eólica, sendo assim, é fundamental que a cota da plataforma seja igual à cota do anel de fundação (Figura 3.8) [9].

Apesar de não ser necessário o mesmo grau de compactação é importante que o espaço em redor das plataformas tenha capacidade resistente, por existir a possibilidade de ser necessária a colocação de outras guas para auxiliar os trabalhos de montagem, bem como utilizar esse espaço para manuseamento das várias componentes do aerogerador [9].



Figura 3.8 - Plataformas de montagem [9].

3.5.2 Fundação

A fundação mais utilizada é a sapata isolada (Figura 3.9), cujo dimensionamento dependerá das características do aerogerador (e da torre) e da constituição do solo de fundação. É realizado um estudo geológico/geotécnico com intuito de estabelecer a capacidade do terreno para suportar as várias tensões a que será submetido, tal como anteriormente descrito no subcapítulo 3.3. Um parâmetro fundamental para o dimensionamento da fundação é o valor da tensão admissível do terreno (σ_{terreno}) [9].

Referente ao cálculo da fundação há que ter em conta, o peso, a altura da torre, as dimensões e a estrutura do aerogerador, para além de outros fatores que afetam o dimensionamento e cujas ações que terão de ser consideradas, tais como o vento, o gelo, a neve [9].



Figura 3.9 - Exemplo de fundação [s36].

3.5.2.1 Processo de construção da sapata

As sapatas possuem um suporte que dependendo do anel de fundação variará de dimensões. Habitualmente as sapatas possuem uma planta ortogonal ou circular. A execução das fundações deverá cumprir os seguintes procedimentos [2]:

- ✓ Cumprir a implantação definida na planta do projeto de execução de fundações;
- ✓ Para as fundações das torres, é necessário a realização de sondagens para a caracterização da natureza dos solos;
- ✓ Para a escavação é utilizada uma retroescavadora. Se perante um solo rochoso poderá ser necessária a utilização de meios de maior potência instalados na retroescavadora;
- ✓ Escavação de terrenos, ou rocha de qualquer tipo, com todos os trabalhos necessários, como remoção, entivação, drenagem e todos os trabalhos complementares;
- ✓ Uma camada de regularização e limpeza, compactada, com 10 cm de espessura, de Betão pelo menos da classe C 12/15;
- ✓ Aplicação de Betão pelo menos da classe C 35/45 nas fundações das torres;
- ✓ Cofragem e descofragem;
- ✓ No caso de a fundação ser executada na íntegra sobre uma superfície rochosa é necessário recorrer a desmonte a fogo (detonação controlada), concluindo-se o trabalho com maquinaria, e em alguns casos através de meios manuais;
- ✓ Nas armaduras das fundações das torres, a aplicação de varão de aço do tipo A500NR;
- ✓ Elementos para a fixação das torres como anéis, chumbadouros;

- ✓ Tubagens para os cabos elétricos e para a drenagem das fundações;
- ✓ Colocar isolante para a cura e selagem do betão;
- ✓ Por fim, o fecho superior dos maciços de fundação é em geral executado com elementos da escavação, por camadas adequadamente compactadas.

Durante a execução da sapata e do suporte, introduzem-se os tubos a fim de serem incorporados os cabos de tensão, sendo também executadas as conexões de terra às armaduras da fundação [9].

3.5.2.2 Utilização de estacas na sapata

Caso estejamos perante um solo com pouca resistência o que o torna inviável para a fundação da torre eólica, é necessário recorrer à execução de fundação profunda, por meio de estacas de modo a transmitir os esforços às camadas resistentes do solo.

Não existe um *standard* para o tipo de estacas, embora as estacas mais comuns sejam as estacas moldadas em betão armado e o processo mais utilizado é o de tubo moldador não recuperável.

A execução das estacas recorrendo ao tubo moldador não recuperável (Figura 3.10) passa por várias etapas, nomeadamente [s27]:

- ✓ Identificar o local onde irão ser executadas as estacas;
- ✓ Seleção do equipamento para a furação;
- ✓ Cravação de um tubo com um diâmetro superior ao da estaca;
- ✓ Inclusão do tubo moldador, por pressão ou vibração;
- ✓ Extração do terreno com recurso a equipamento adequado;
- ✓ Com esse equipamento procede-se à limpeza do fundo do furo;
- ✓ Coloca-se a armadura;
- ✓ Betona-se;
- ✓ Executa-se saneamento da cabeça das estacas;
- ✓ Por fim, procede-se à execução do maciço de fundação a partir do processo descrito anteriormente.



Figura 3.10 - Execução das estacas [s27].

3.5.3 Valas para cabos

Faz parte do projeto a instalação da tubagem para encaminhamento dos cabos, tanto de potência como de controlo, para interconectar os aerogeradores entre eles e a subestação [9].

Usualmente as tubagens dos caminhos de cabos são executadas paralelamente à via que liga os aerogeradores, devendo interligar-se com a subestação, por vezes também é necessário garantir travessias das vias, perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. É de salientar que o tipo de tubagem que segue paralelamente às vias é distinto dos caminhos de cabos das travessias (que têm de suportar o peso dos camiões grua) [9].

Na tubagem longitudinal os cabos de média tensão não são cimentados nem protegidos por tubos, enquanto na tubagem para travessias, os cabos são protegidos por um tubo de polietileno de alta densidade com diâmetro de 160 mm [9].

3.5.3.1 Tubagem longitudinal

Mais detalhadamente, para elaborar uma tubagem longitudinal, ou seja uma tubagem paralela à via, devem ser considerados os seguintes trabalhos (Figura 3.11) [9]:

- ✓ A vala ter uma profundidade de 1,2 metros e uma largura no mínimo de 1 metro;
- ✓ O cabo de terra situa-se no fundo da vala, e 15 cm acima estarão os cabos de energia e de controlo;

- ✓ Os cabos deverão ser tapados adequadamente com areia compactada, com uma espessura de 60 cm;
- ✓ Na parte superior da areia ficam situadas as lajetas de proteção;
- ✓ Por fim, cobre-se o restante da vala com o material que foi escavado e compacta-se.

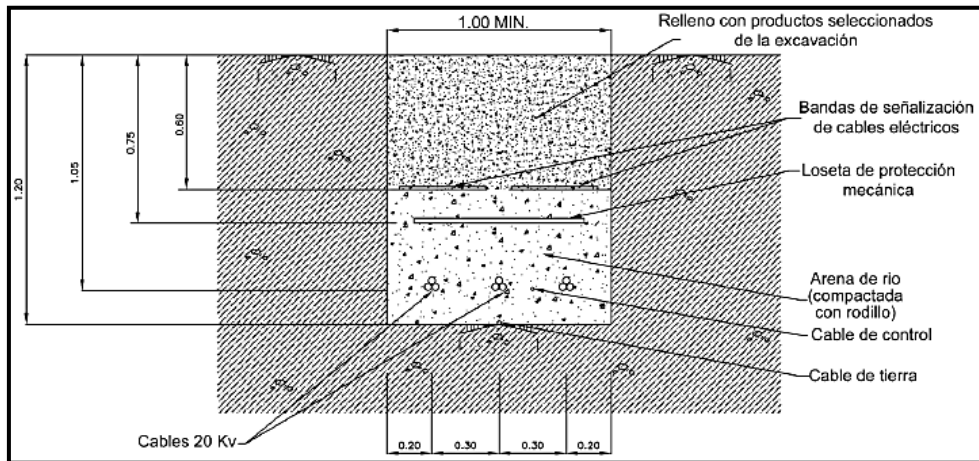


Figura 3.11 - Vala longitudinal [9].

3.5.3.2 Tubagem para travessias

No que concerne à tubagem realizada em travessias (Figura 3.12), tem-se [9]:

- ✓ No caso de se tratar de cabos de energia ou de rede de dados, os cabos em todo o seu percurso, situam-se dentro de tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), rígidos ou flexíveis e com tritubo de polietileno flexível;
- ✓ Os tubos para cabos de energia são betonados durante todo o seu percurso, enquanto os tritubos estarão posicionados acima do betão com uma profundidade mínima de 0,5 m.

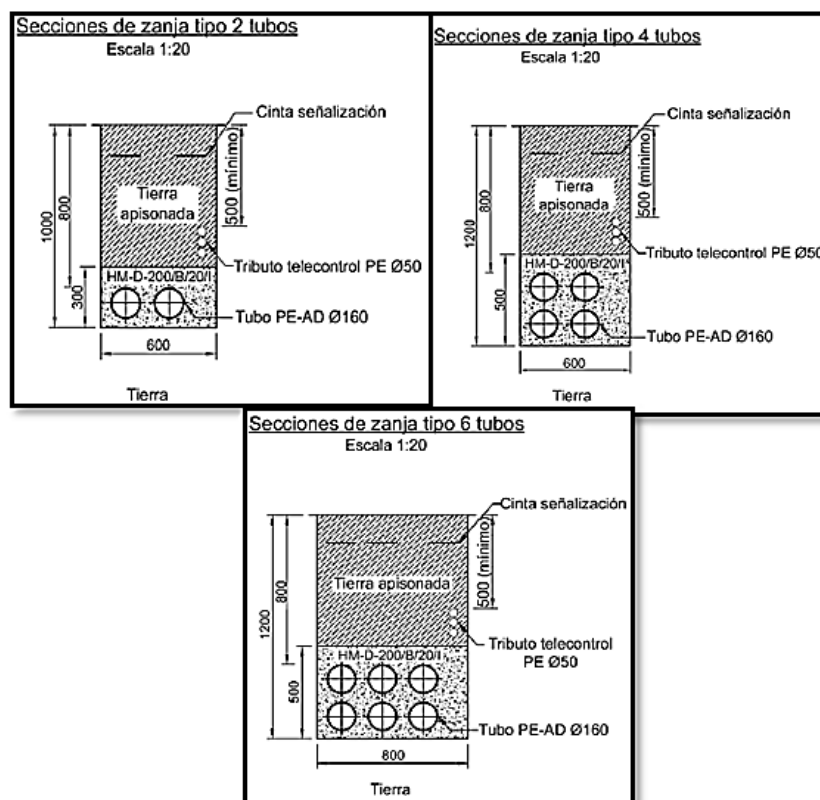


Figura 3.12 - Vala para cruzamento de vias [9].

3.5.4 Edifício de Comando e Subestação

Em geral, são necessários pelo menos 4 meses para a construção do edifício de comando e subestação. Comumente, estes trabalhos são executados em simultâneo com os trabalhos referentes aos acessos, plataformas, valas de cabos e fundações (ver Figura 3.13) [2].

No que diz respeito à construção do edifício de comando, não difere muito da construção de um edifício de piso térreo. A diferença reside na compartimentação (que não existe) na rede de terras, nas caleiras de cabos e no equipamento elétrico que contém [2].

Mais detalhadamente, as redes de terras são executadas pelo empreiteiro logo após a escavação e têm que garantir 1 (um) Ohm de resistividade. Relativamente às caleiras são utilizadas para os cabos e têm de ser respeitadas as suas profundidades, sendo realizadas a seguir às fundações. Por último, após os trabalhos de acabamento estarem concluídos o empreiteiro da especialidade de eletricidade procede à instalação do equipamento elétrico [2].



Figura 3.13 - Edifício de comando [2].

Relativamente à construção civil da subestação incluem-se os trabalhos a realizar em simultâneo com a construção do edifício de comando [2] (Figura 3.14):

- ✓ Caleiras de cabos;
- ✓ Maciços de fundação das estruturas elétricas;
- ✓ Bacias de retenção dos óleos.

Depois da instalação das fundações das estruturas elétricas e da rede de terras elétricas, procede-se ao acabamento final do solo. Habitualmente é coberto com gravilha, por fim são colocadas as vedações exteriores [2].

Finalmente são executados os arranjos exteriores, nomeadamente os passeios exteriores para além de os lugares de estacionamento na zona do Edifício de Comando e da Subestação [2].



Figura 3.14 - Exemplo de subestação [s34].

4 Constituição de um Parque Eólico

No presente capítulo descrevem-se os principais constituintes que um parque eólico deve conter, de modo a produzir energia através do vento.

4.1 Principais elementos de um parque eólico

O objetivo final de um parque eólico consiste no aproveitamento da velocidade do vento para a produção de energia elétrica. Para que aconteça é necessário que o parque seja constituído por alguns elementos essenciais, nomeadamente, um conjunto de aerogeradores que são interligados por cabos de média tensão e cabos de comunicação ligados a uma Subestação e a um Edifício de Comando, que se liga a uma (habitualmente aérea) Rede elétrica de transporte (ver Figura 4.1) [2].

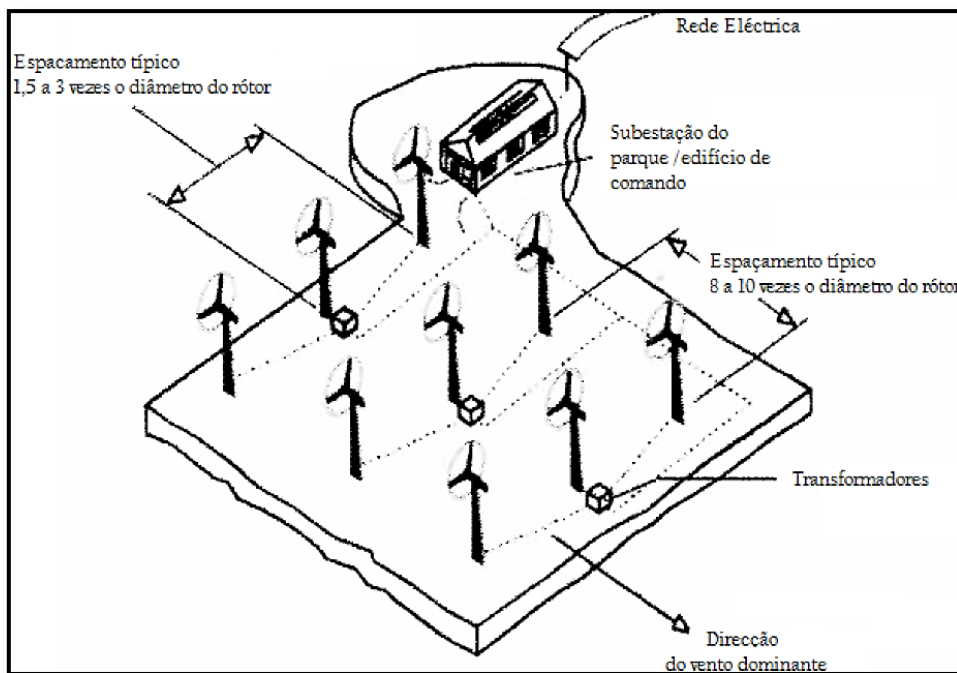


Figura 4.1 - Principais elementos de um parque eólico industrial [13].

4.2 Funcionamento do aerogerador

A produção de energia passa por vários processos. A Figura 4.2 ilustra os diversos procedimentos desde a rotação das pás a partir do vento até a distribuição aos domicílios a partir da rede elétrica [s28].

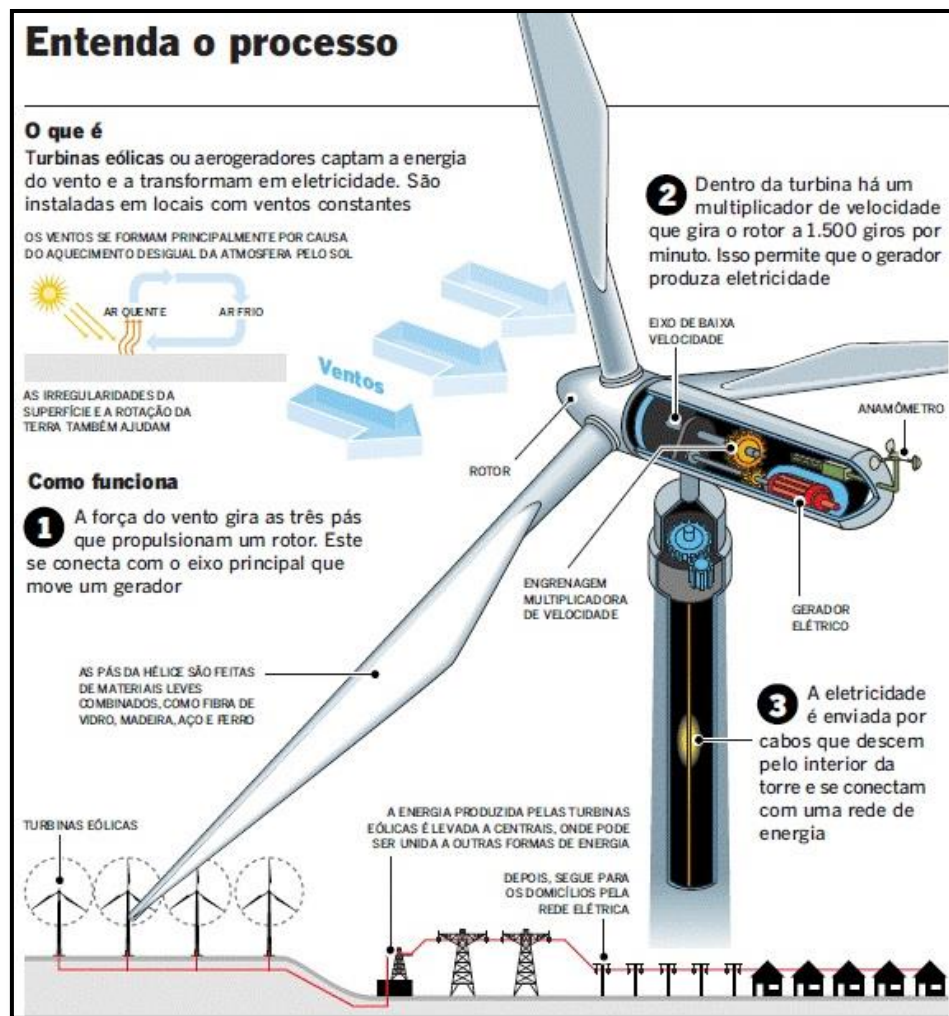


Figura 4.2 - Processo de Energia Eólica [s28].

4.3 Componentes do sistema

O sistema mais utilizado para a conversão de energia eólica em energia elétrica consiste em um aerogerador de eixo horizontal, constituído por três partes fundamentais: Rotor, Cabina (*Nacelle*) e Torre (ver Figura 4.3) [8].

A torre é o elemento que sustenta os restantes componentes do aerogerador e está situada sobre a fundação. Relativamente à *Nacelle* encontra-se apoiada na torre, é onde se situam os principais sistemas mecânicos e o gerador, por último o rotor fica encarregue de converter a energia do vento em energia mecânica [8].

Na Figura 4.3 pode-se observar os componentes mencionados, para além dos restantes componentes do aerogerador [1].

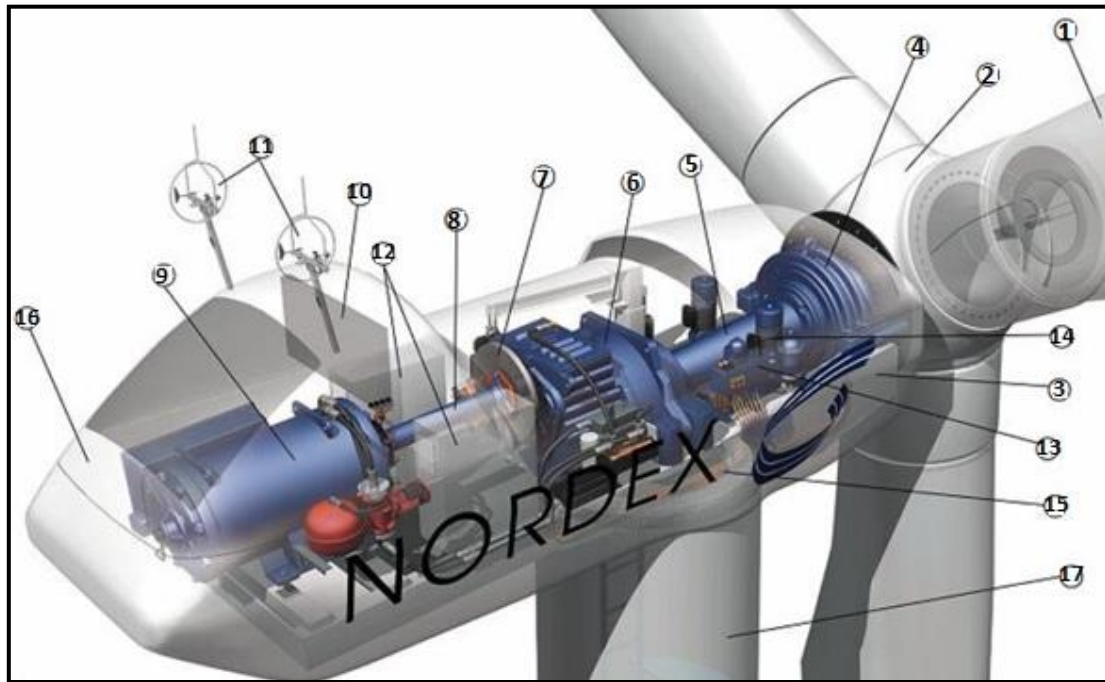


Figura 4.3 - Esquema de uma típica turbina eólica [1].

Legenda:

- 1- Pás do rotor;
- 2- Cubo do rotor;
- 3- Cabina;
- 4- Chumaceira do rotor;
- 5- Veio do rotor;
- 6- Caixa de velocidades;
- 7- Travão do disco;
- 8- Veio do gerador;
- 9- Gerador;
- 10- Radiador de arrefecimento;
- 11- Anemómetro e sensor de direção;
- 12- Sistema de controlo;
- 13- Sistema hidráulico;
- 14- Mecanismo de orientação direcional;
- 15- Chumaceira do mecanismo de orientação;
- 16- Cobertura da cabina;
- 17- Torre.

4.3.1 Rotor

O rotor é formado pelas pás e pelo cubo do rotor (Figura 4.4), sendo o componente mais característico de um sistema eólico, para além de ser o responsável por captar a energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica de rotação [13, 8].

No que concerne à posição do rotor, relativamente à superfície de ataque do vento incidente das pás, pode ser colocado a montante ou a jusante da torre. Do qual se designa como [1]:

- ✓ Opção *Upwind*: a abordagem do vento nas pás é realizada pela parte da frente, o vento não é perturbado pela torre;
- ✓ Opção *Downwind*: neste caso a abordagem do vento nas pás é feita pela parte de trás, permitindo um auto alinhamento do rotor na direção do vento, contudo esta opção tem vindo a ser excluída pelo simples facto de o escoamento do vento ser perturbado pela torre antes de incidir no rotor.

Denomina-se por *solidez* a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas pás. No caso de a solidez e o diâmetro das pás se manterem constantes, o aumento do número de pás é acompanhado com um aumento do rendimento, como consequência da diminuição das perdas de vento na extremidade das pás [8].

Caso o número de pás seja alterado, de duas para três, a energia capturada ao vento cresce aproximadamente entre 3 a 5%. Contudo, o valor vai decrescendo à medida que vamos aumentando o número de pás. A solução que melhor otimiza a relação de benefício: preço-custo é a de ter aerogeradores com três pás [8].

De referir, que é necessário que o cubo do rotor (local de fixação das pás ao veio principal) consiga baloiçar, *teetering hub*, ou seja, terá que apresentar um ângulo de inclinação relativamente á vertical, *tilt angle*, de maneira a colmatar os desequilíbrios resultantes da passagem das pás em frente à torre [1].

Relativamente há a seleção de materiais para a construção do rotor é feito cuidadosamente, pois ao longo da sua vida útil o rotor está sujeito a esforços mecânicos e a condições atmosféricas adversas [8].



Figura 4.4 - Rotor [s39].

4.3.2 Cabina – *Nacelle*

Na *Nacelle*, entre outros equipamentos, situa-se o veio principal, o travão de disco, o gerador, o mecanismo de orientação direcional e a caixa de velocidades (no caso de existir). No cume da cabina encontra-se situado um anemómetro e o respetivo sensor de direção [1].

A cabina está ligada à torre por forma a rodar em torno do seu centro possibilitando a orientação do eixo na direção do vento (ver Figura 4.5 – cabina em elevação) [13].

Para extrair a máxima energia possível é imperativo que o rotor fique alinhado com a direção do vento, sendo assim, com a ajuda de um mecanismo de orientação direcional, (composto por um motor) aquando é recebida a informação do sensor de direção do vento, a *Nacelle* e o rotor rodam até que a turbina eólica fique corretamente posicionada [1].



Figura 4.5 – Cabina [s40].

4.3.3 Torre

A torre é essencial para suportar e posicionar o rotor numa altura necessária para o seu funcionamento, estando sujeita a vários esforços, nomeadamente peso, forças horizontais, resistência do rotor, ações dinâmicas do vento e do aerogerador [13].

Existem dois tipos de torres: tubulares e treliçadas (Figura 4.6). As torres tubulares são constituídas por aço ou betão, sendo os diversos troços ligados no local com auxílio de uma grua. Este tipo de torre é considerada a mais segura para o pessoal da manutenção, porque podem aceder à plataforma da *Nacelle* a partir de uma escada ou elevador no interior das torres. No que concerne às torres treliçadas, são mais económicas, as fundações são mais simples e o efeito de “sombra” é atenuado. No entanto, têm vindo gradualmente a ser abandonadas, sobretudo pelo impacto visual e pelo aumento crescente da altura das torres [1].



Figura 4.6 - Exemplo de torres: a) torre tubular; b) torre treliçada [1].

5 Caso de estudo para a construção de um Parque Eólico Industrial

No presente capítulo apresenta-se o caso de estudo desenvolvido na presente dissertação. A realização do caso de estudo baseou-se essencialmente nos capítulos 3 e 4 (subcapítulo 5.1 a 5.7), apresentando-se ainda um planeamento (subcapítulo 5.8) e um orçamento (subcapítulo 5.9).

5.1 Localização

O Parque Eólico Industrial em estudo situa-se na freguesia da Tocha, concelho de Cantanhede, distrito de Coimbra, entre a Praia da Tocha e o Palheirão. Mais precisamente junto ao vértice geodésico, cujo nome é “*Palheiros da Tocha*”, e da travessia da estrada EN335-1 com a estrada Florestal 1 [s29].

O acesso ao parque eólico realiza-se a partir do centro da freguesia da Tocha pela estrada nacional 335-1. A área apresenta cerca de 23 000 metros quadrados.

Na Figura 5.1, apresenta-se a localização geográfica da obra, com especial incidência no local de implantação dos aerogeradores, edifício de comando e subestação. No Anexo B apresenta-se a Planta geral e de condicionantes da área de estudo [s30].

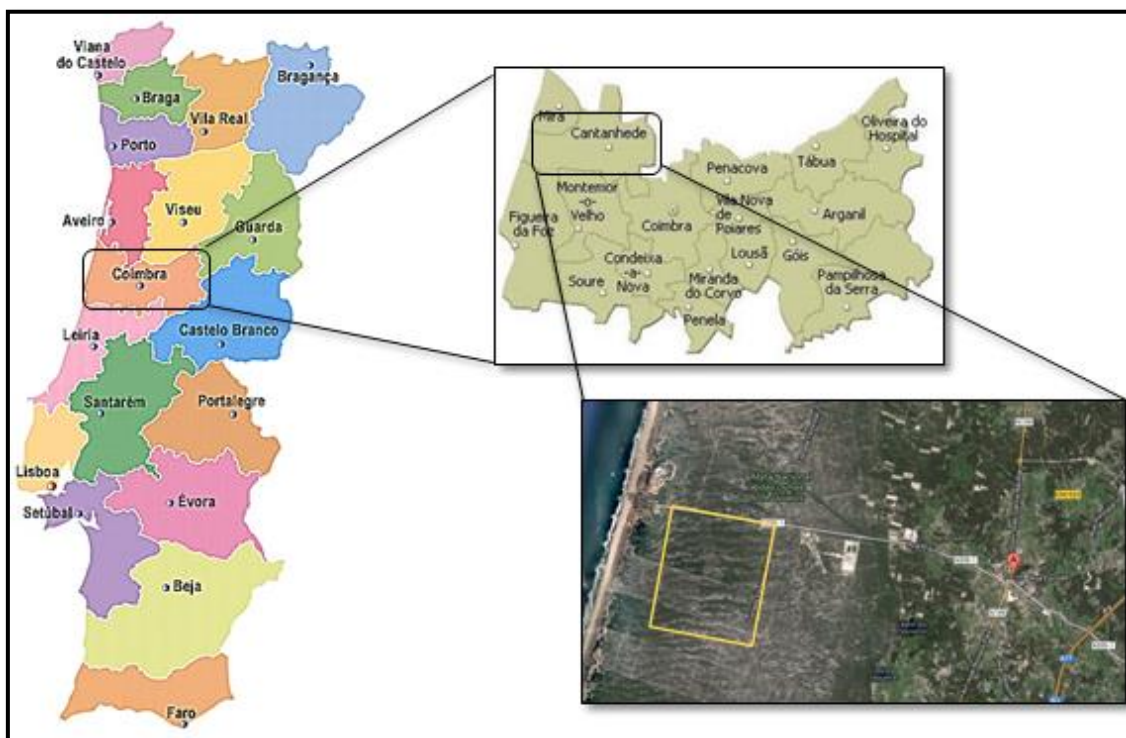


Figura 5.1 - Localização geográfica do Parque Eólico na freguesia da Tocha.

5.2 Principais características do Parque eólico

O parque eólico é constituído pelos seguintes elementos [s30]:

- ✓ 5 Aerogeradores, com uma potência unitária de 1,8 MW, o que perfaz a uma potência instalada no total de 9 MW, e uma produção de energia elétrica anual de 19,1 GWh;
- ✓ Torre meteorológica permanente;
- ✓ Subestação;
- ✓ Edifício de comando;
- ✓ Caminhos de acesso;
- ✓ Rede elétrica de cabos subterrâneos com ligação entre os aerogeradores e com o edifício de comando/subestação.

A energia gerada é conduzida por uma linha de potência 15KV com 5 quilómetros de extensão e que pertence à Rede Nacional de Distribuição (RND), que por sua vez integra a Rede Elétrica de Serviço Público [95].

A Tabela 5.1 apresenta as dimensões dos elementos do Parque [14].

Tabela 5.1 – Dimensões dos elementos do Parque.

	Descrição	Dimensão
Fundação	Laje quadrada de betão armado com recurso a fundações indiretas.	Largura e comprimento de 14.00 m, altura variável de 1.5 m nas extremidades e 3.00 m no centro. Com 16 estacas de 1m de diâmetro. Ocupa uma área de 196 m ² .
Torre	Torre de aço carbono, insere-se na fundação através de um plinto em betão com secção quadrada.	Altura de 95 m e diâmetro de 4m. Pás com comprimento de 50 m. Por fim o plinto tem um comprimento e largura de 4.50m que se eleva da sapata a 0.16m.
Subestação	_____	Ocupa 1000 m ² do terreno.

5.3 Estudo de Impacto Ambiental

Os critérios de adjudicação dos concursos para a construção dos parques contêm uma extensa lista de requisitos a cumprir pelos concorrentes.

A incorreta localização do parque pode originar impactos negativos. Como prevenção cabe as entidades competentes efetuar uma análise ao local [15].

Para se obter o licenciamento do parque o impacto ambiental terá de ser avaliado. Essa avaliação passa pelo Estudo de Impacto Ambiental (ou Estudo de Impacte Ambiental) (EIA), que consiste num documento técnico onde são avaliadas as consequências que um projeto poderá suscitar no meio ambiente [15].

5.4 Execução da Obra Civil

O empreiteiro da construção civil inicia a obra após o contrato ter sido assinado pelo Dono-de-Obra (entidade adjudicante) e pelo Empreiteiro Geral (entidade adjudicatária), em geral o fabricante de aerogeradores. O empreiteiro geral é o responsável pela montagem do estaleiro, sinalização da obra, delimitação das áreas de intervenção e da melhoria dos acessos, bem como da execução de todas as especialidades técnicas, comissionamento e colocação em serviço [2].

Mais pormenorizadamente a empreitada de construção do parque eólico abrange os seguintes trabalhos [14]:

- ✓ Limpeza do terreno;
- ✓ Melhoramento ou construção de acessos;
- ✓ Abertura de escavação para as fundações dos aerogeradores;
- ✓ Abertura das valas para a rede de média tensão;
- ✓ Terraplanagens na área da subestação;
- ✓ Construção do edifício de comando;
- ✓ Betonagem dos maciços das fundações e dos equipamentos da subestação;
- ✓ Transporte e montagem dos equipamentos;
- ✓ Colocação em serviço;
- ✓ Recuperação paisagística da zona envolvente.

5.4.1 Regime de ventos

Como referido no subcapítulo 3.2, antes de ser implantado um parque eólico, é primordial estudar o regime de ventos da zona envolvente. Neste caso as medições no

terreno foram realizadas durante aproximadamente 3 anos, tendo-se concluído que o local era favorável para a elaboração de um empreendimento de tamanha importância [s31].

Resumidamente, trata-se de uma zona com velocidades de vento entre 3 m/s e 20 m/s, sendo o vento maioritariamente uniforme e rentável [s31].

5.4.2 Estudo geológico geotécnico

O estudo geológico-geotécnico foi realizado com base em trabalhos de reconhecimento geológico de superfície e de prospeção geológica-geotécnica. Os trabalhos de prospeção desenrolaram-se através da realização de 5 sondagens mecânicas e da execução de ensaios *in-situ*.

Após o estudo geológico-geotécnico verificou-se que os solos onde se irão situar as fundações das futuras infraestruturas do parque eólico são predominantemente de natureza arenosa. Com exceção na sondagem S3, a uma profundidade de 22 a 33 metros, verificou-se uma intersecção de um horizonte siltoso com um metro de espessura, onde se situa o aerogerador 3 (AG03).

Para solucionar o problema, o maciço terroso foi dividido em duas unidades geológicas:

✓ Unidade Geológica UG1

Na zona de depósito de cobertura da área em estudo, o solo é constituído por areias quartzosas, de granulometria média, soltas nos troços superficiais progredindo à medida que a profundidade aumenta para medianamente compactas a compactas. Esta zona de depósito de cobertura apresenta uma espessura variável entre 7 e aos 11 metros. Relativamente às cotas de altimetria, as profundidades são aproximadamente de 11 metros para o AG01 e de entre 17 a 22 metros para os locais dos aerogeradores AG02 a AG05.

✓ Unidade Geológica UG2

A unidade geológica UG2 encontra-se subjacente à anterior (unidade geológica UG1), é constituída por areias quartzosas, muito compactas, com granulometria de fina a média, e casualmente alternâncias de areias grosseiras.

Por último, tendo em conta a sondagem S3 encontra-se evidenciada a ocorrência de níveis silteosos cinzento escuro, apresentando-se com uma consistência francamente dura, e com espessuras inferiores a 1 metro.

✓ **Conclusão final para a fundação**

Em suma, tendo como base o relatório geotécnico, conclui-se que para todos os locais de implantação de aerogeradores estudados, a fundação direta não é uma solução plausível, uma vez que não satisfaz as exigências da natureza da obra a fundar.

Como tal, a melhor solução para a fundação em estudo é o dimensionamento de fundações profundas, com auxílio de estacas apoiadas a uma profundidade tal que seja possível a intersecção da zona geotécnica ZG1.

5.4.3 Descrição da Fase de construção

5.4.3.1 Instalação do estaleiro

Face ao empreendimento, foi necessário montar estaleiro para dar apoio à execução da obra. O estaleiro ocupava uma área de aproximadamente 1000 m², e foram tomadas várias medidas para facilitar o trabalho na área, nomeadamente [16]:

- ✓ Instalados contentores com cerca 10 m² de área cada, que se destinaram a escritórios, armazenamento de equipamentos e ferramentas;
- ✓ Definidos locais para o estacionamento de veículos e para o armazenamento dos materiais essenciais à realização da obra;
- ✓ No estaleiro foi delimitada uma área específica para o depósito temporário de resíduos produzidos no decorrer da obra.

5.4.3.2 Acessos ao parque e vias no parque

As vias de acesso ao parque são estudadas, por uma equipa especializada, que realiza medições com auxílio de equipamento laser para verificar se as vias previstas para o transporte dos equipamentos são adequadas, pois por vezes é necessário adoçar taludes para a passagem das pás.

Neste parque, o primeiro passo consistiu na reabilitação dos acessos existentes às necessidades exigidas, bem como na criação de acessos no futuro parque até aos locais de implantação dos aerogeradores [16].

Durante as obras de reabilitação e aberturas de acessos, foi de primordial importância proceder-se ao alargamento e estabilização do pavimento da via como também à execução de infraestruturas de drenagem (ver Figura 5.2) [16].



Figura 5.2 - Exemplo de uma caixa de queda para passagem hidráulica [16].

Ao longo das vias que ligam os aerogeradores, procedeu-se à abertura de uma vala para a instalação dos cabos elétricos de interligação entre os aerogeradores e o edifício de comando/subestação (Figura 5.3) [16].

Neste caso de estudo apenas será necessário a utilização de tubagem horizontal, paralela à via.

Sendo assim, como anteriormente descrito (subcapítulo 3.5.3), a vala situa-se a uma profundidade de 1,2 metros e possui uma largura de 1 m. Após a abertura da vala procedeu-se à colocação dos cabos de média tensão da responsabilidade do empreiteiro da parte elétrica. Posteriormente os cabos foram cobertos com uma nova camada de areia, de espessura de 60 cm, e por cima da areia colocadas lajetas de proteção, com intuito de proteger os cabos. Posto isto, os cabos foram sinalizados com uma fita sinalizadora e por último recobriu-se a parte restante da vala com o material de escavação e compactou-se [2, 9].



Figura 5.3 - Caminho de cabos [2].

5.4.3.3 Fundação

O dimensionamento da fundação da torre eólica foi executado com recurso ao programa de cálculo automático SAP2000.

Para o cálculo da fundação foi facultado a planta e corte da fundação, os materiais empregados na execução da fundação da torre e as ações resultantes.

O comprimento das estacas das fundações dos aerogeradores AG02 a AG05 é de 22 metros, no aerogerador AG01 é de 11 metros.

5.4.3.3.1 Introdução do SAP 2000

O SAP 2000 é um *software* de engenharia civil utilizado para dimensionamento de qualquer tipo de sistema estrutural. Os sistemas podem ser básicos e avançados, passando de 2D para 3D, como de uma geometria simples para complexos, para além de serem modelados, analisados, projetados e otimizados com auxílio de um ambiente de modelagem baseada em objetos práticos e intuitivos por forma a simplificarem o processo de engenharia [s32].

5.4.3.3.2 Descrição dos materiais utilizados na sapata

✓ Betão

Para a escolha do betão, foram utilizados alguns critérios com base em requisitos especificados na norma NP EN 206-1. Os requisitos remetem-se à durabilidade e são definidos a partir de classes de exposição ambiental a que a estrutura está sujeita [17].

O betão da fundação da torre eólica do caso em estudo, nomeadamente na sapata, no pedestal e nas estacas, é o betão C35/45. É um betão normal com uma resistência característica à compressão de 35 MPa medida em provete cilíndrico normalizado e igual a 45 MPa medida em provete cúbico normalizado [105]. Relativamente à classe, por estarmos perante um ambiente numa zona de marés, trata-se de uma classe XS3 [17].

A Tabela 5.2 aborda sobre as características principais do betão utilizado para o caso de estudo.

Tabela 5.2 - Características principais do betão utilizado.

Betão C35/45	
$f_{ck} =$	35 MPa
$f_{cd} =$	23,3 MPa
$F_{ctm} =$	3,2 MPa
$F_{ctk, 0,05} =$	2,2 MPa
$F_{ctk, 0,95} =$	4,2 MPa
$E_{cm} =$	34 GPa
$\nu_c =$	0,2
$\gamma_c =$	25 KN/m ³

✓ **Aço**

A armadura adotada para a fundação do caso de estudo foi o Aço A500NR da classe C (aço de alta ductilidade) com as características apresentadas na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Características do Aço.

Aço A500 NR SD	
$F_{yk} =$	500 MPa
$F_{yd} =$	435 MPa
$E_s =$	200 GPa
$E_{yd} =$	0.002175
$\gamma_s =$	78,5 KN/m ³

5.4.3.3.3 Dimensionamento da fundação

Como supracitado, para o cálculo da sapata foi utilizado o programa SAP 2000. Seguidamente é apresentado sucintamente o procedimento realizado para o cálculo das fundações dos aerogeradores, AG02 a AG05 com comprimento de 22m.

A fundação em estudo consta de uma sapata trapezoidal vista em corte e quadrada vista em planta, de betão armado, com 14,00 m cada lado, com uma altura nas extremidades de 1,5 m, e com 3,0 m no centro. A sapata é fundada com recurso a fundações indiretas materializadas por 16 estacas com 1,0 m de diâmetro, moldadas, em betão-armado. Por fim a torre é inserida num plinto em betão com uma secção quadrada com 4,50 m e uma elevação de 0,16 m.

A Figura 5.4 e a Figura 5.5 representam o corte e a planta da fundação, respetivamente.

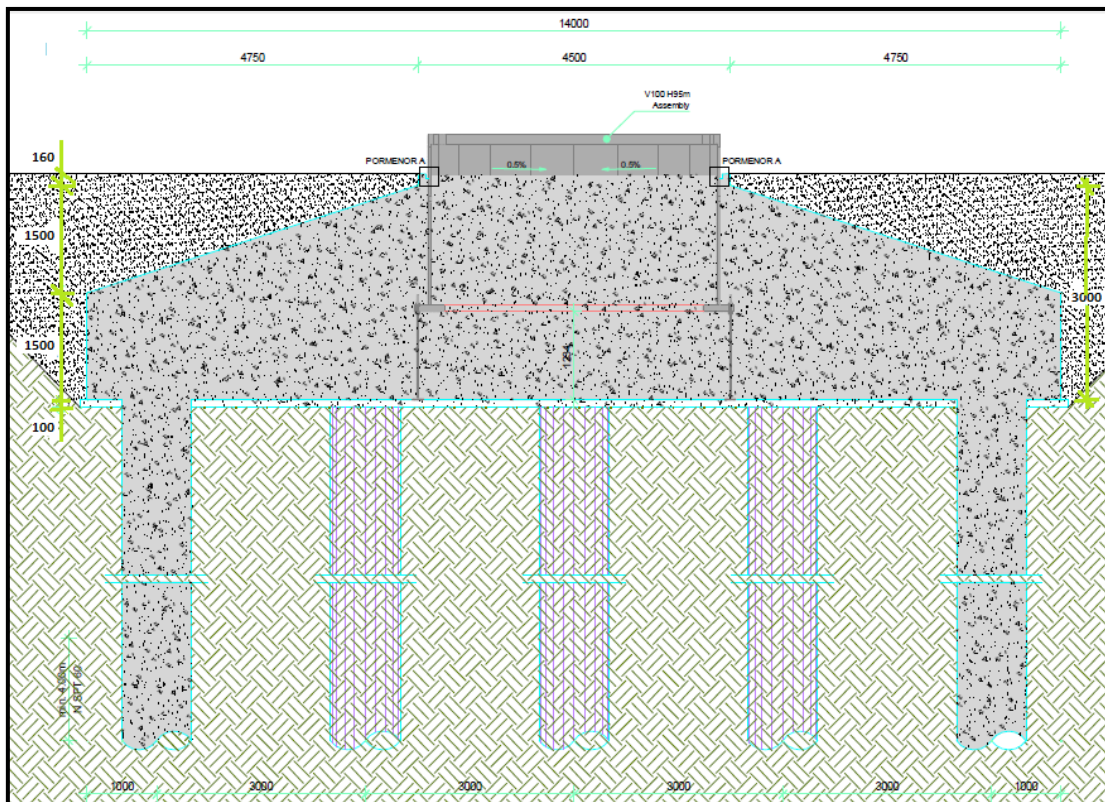


Figura 5.4 - Fundação de torre eólica. Corte (mm).

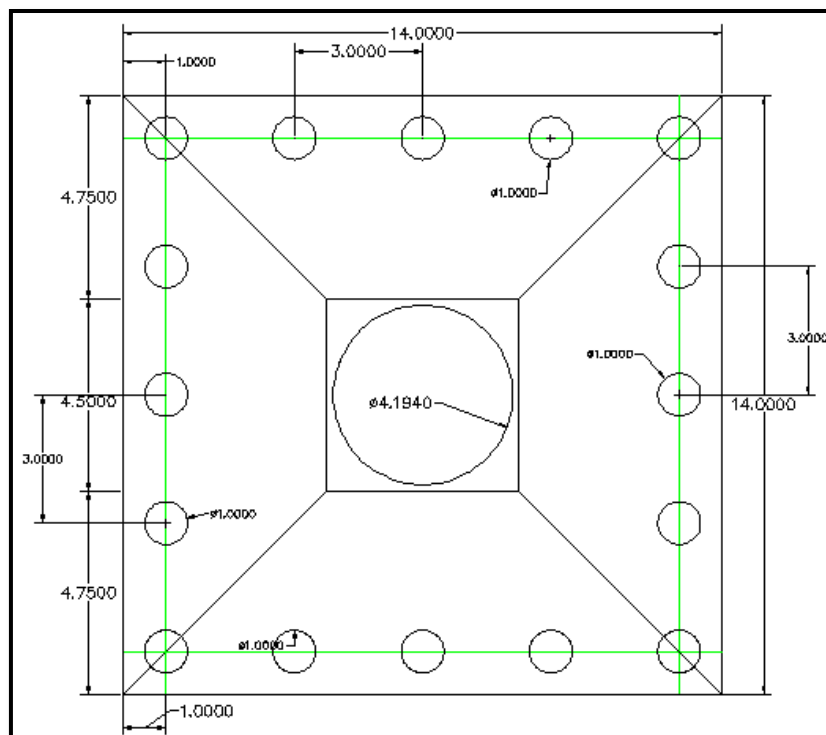


Figura 5.5 - Fundação de torre eólica. Geometria em planta (m).

Para o cálculo da fundação foram utilizadas ações resultantes já majoradas fornecidas pelo fabricante da torre e do aerogerador. Na Figura 5.6 é possível observar as ações exercidas na sapata e na Tabela 5.4 os valores das ações resultantes.

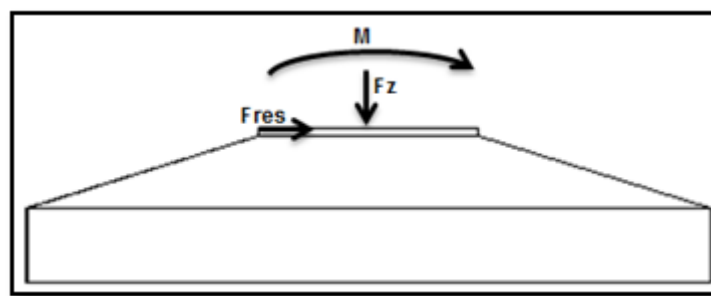


Figura 5.6 - Ações exercidas na sapata.

Tabela 5.4 – Ações resultantes.

Fz	7975.60 KN
Fres	976.80 KN
Mz	1300.20 KN.m
Mres	93372.05 KN.m

✓ **Cálculo da fundação dos aerogeradores de AG2 a AG5**

Após o cálculo da fundação dos aerogeradores de AG2 a AG5 (Anexo A), o programa permitiu obter a deformada da sapata. Uma vez que a sapata é simétrica e as cargas solicitadas pela mesma são no sentido da força de gravidade, a base da sapata tem uma deformação convexa e simétrica em relação aos limites da sapata. Como expectável as estacas apresentam uma deformação côncava acompanhando o sentido da deformação da sapata (Figura 5.7).

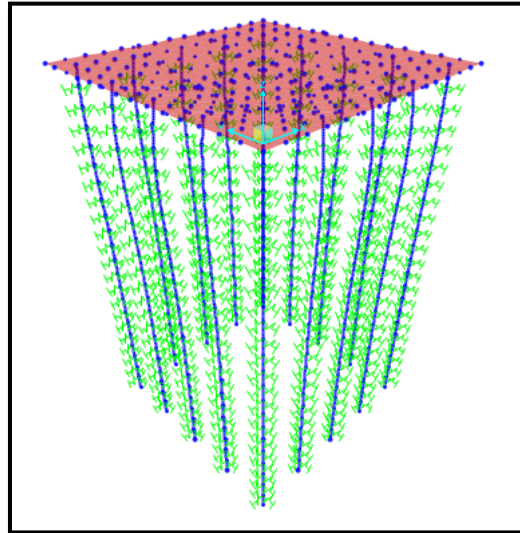


Figura 5.7 - Deformação da sapata.

Após o programa ter sido concluído, são analisados os momentos fletores no eixo OX (Figura 5.8 (a)) e no eixo OY (Figura 5.8 (b)).

Por as ações resultantes atuarem no centro da sapata, obtém-se maiores momentos fletores tanto no eixo OX como no eixo OY, nessa zona. Os diagramas dos momentos fletores representam o que já era de esperar, com valores mais elevados no centro da sapata, como pode-se observar na figura 56.

O momento mínimo é de -537,642 kN.m/m e o momento máximo é de 3118,990 kN.m/m.

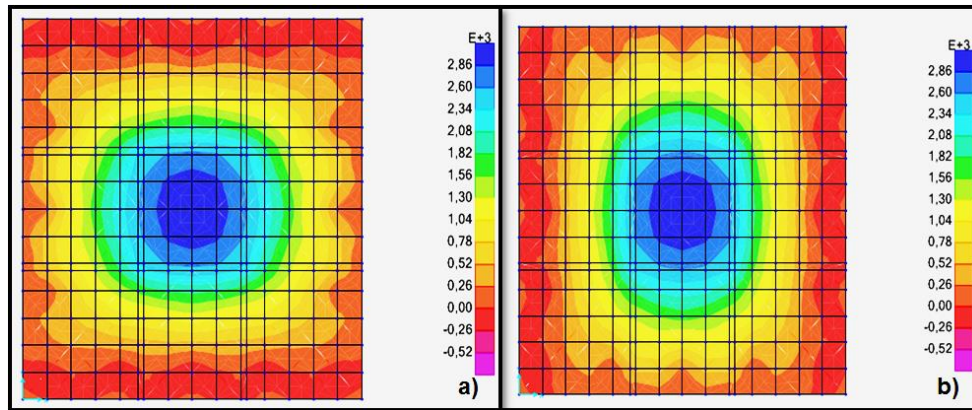


Figura 5.8 - Representação dos momentos: a) OX; b) OY.

Interessa efetuar o dimensionamento das armaduras das estacas. Como pode-se observar na Figura 5.9, a cor das estacas apresentadas, situa-se abaixo do nível vermelho mais precisamente na linha laranja, concluindo-se que as estacas suportam o peso que lhes é solicitado.

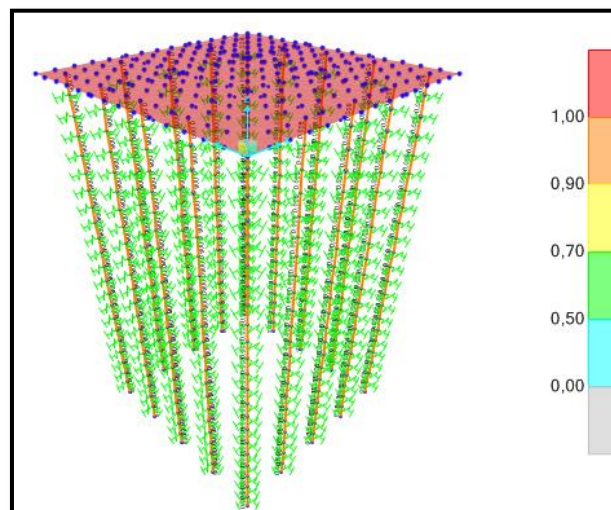


Figura 5.9 - Dimensionamento das armaduras nas estacas.

✓ **Estado Limite da Capacidade Resistente do Terreno para AG02 a AG05**

O cálculo da capacidade resistente do terreno foi efetuado recorrendo à publicação: “Estruturas de Suporte e Fundações II” do Instituto Superior Técnico, página 207 [18].

Na Figura 5.10 podemos observar a estaca em estudo.

Dados:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Sondagem S1} \rightarrow \phi'_{\text{médio}} = 35^\circ$$

$$\text{Sondagem S2} \rightarrow \phi'_{\text{médio}} = 33^\circ$$

Valor característico, considerando os resultados correspondentes a todos os ensaios efetuados: $\phi'_k = 32^\circ$

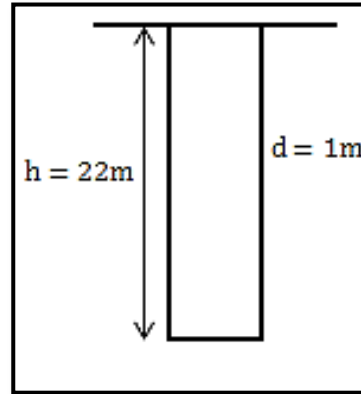


Figura 5.10 - Estaca com 22 metros de comprimento.

Segundo o cálculo elaborado no SAP 2000, retirou-se o valor da força vertical mais desfavorável, $F_{\text{vertical}} = 2462,560 \text{ kN}$ e prosseguiu-se com o cálculo:

a) Capacidade resistente:

a1) profundidade crítica, (Anexo D):

$$\phi'_k = 32^\circ \rightarrow \frac{D_c}{B} = 9 \leftrightarrow D_c = 9 \times 1,0 = 9\text{m} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

a2) capacidade de resistência de ponta:

- tensão efetiva vertical à profundidade a que se encontra a ponta da estaca, (comprimento de estaca no meio portante: $D_b = 22\text{m}$)

$$D_b(22\text{m}) > D_c(9\text{m}) \rightarrow \sigma'_{v \text{ máx}} = \gamma \times D_c = 20 \times 9 = 180 \text{ KPa} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

a3) fator de profundidade (Anexo D):

$$\phi'_{\text{médio}} = 32^\circ \rightarrow N_q = 32$$

a4) valor caraterístico da pressão resistente de ponta:

$$q_{b,k} = \sigma'_{v} \times N_q = 180 \times 32 = 5760 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Eq. 5.3})$$

a5) valor característico da capacidade resistente de ponta:

$$R_{b,k} = q_{b,k} \times A_p = 5760 \times \left(\pi \times \frac{1^2}{4} \right) = 4523,89 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

a6) capacidade resistente lateral

- valor de K (como o contato é com areia admite-se que há boa ligação com o fuste da estaca.)

$$K = K_0 = 1 - \sin 32^\circ = 0,47 \quad (\text{Eq. 5.5})$$

- valor de δ (Anexo D)

$$\delta = \phi$$

-tensão resistente lateral:

$$q_{s,k1} = \overline{\sigma'_v} \times k \times \tan \delta = \left[\left(\frac{1}{2} \times 180 \right) \times 0,47 \times \tan 32 \right] = 26,43 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Eq. 5.6})$$

$$q_{s,k2} = \overline{\sigma'_v} \times k \times \tan \delta = [(180) \times 0,47 \times \tan 32] = 52,86 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Eq. 5.7})$$

-valor característico da capacidade resistente lateral

$$R_{sk} = q_{s,k} \times A_s \leftrightarrow R_{sk} = q_{s,k1} \times \pi \cdot \phi \times D_c + q_{s,k2} \times \pi \cdot \phi \times (D - D_c) = \quad (\text{Eq. 5.8})$$

$$= 26,43 \times \pi \times 1 \times 9 + 52,86 \times \pi \times 1 \times (22 - 9) = 2906,13 \text{ kN}$$

-valor de cálculo da capacidade resistente

$$R_{c,d} = \frac{1}{\gamma_{mod}} \left(\frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} \right) = \frac{1}{1,05} \left(\frac{4523,89}{1,6} + \frac{2906,13}{1,3} \right) = 4821,82 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 5.9})$$

a7) valor de cálculo de força axial de compressão atuante

$$W = h \times \left(\pi \times \frac{\phi^2}{4} \right) \times \gamma_{betão} = 22 \times \left(\pi \times \frac{1^2}{4} \right) \times 25 = 431,97 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

$$F_{cd} = 1,0 \times G + 1,3 \times Q = 1,0 \times 431,97 + 1,3 \times 2462,56 = 3633,30 \text{ kN} \quad (\text{Eq. 5.11})$$

a8) verificação da segurança em relação ao estado limite último por rutura do terreno de fundação devido à força axial de compressão:

$$F_{cd}(3633,30) < R_{cd}(4821,82) \rightarrow \text{Verifica} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

As restantes verificações nas estacas são praticadas a partir do SAP 2000, e como mostra a Figura 5.11 todas as verificações foram cumpridas, como é o caso do estado

limite último de compressão, flexão e por último a verificação ao esforço transversal transversal. Contudo, por ter sido possível obter um valor de área tem-se a confirmação de que as verificações foram cumpridas, pois em caso de alguma verificação não ter sido cumprida o programa não indicaria o valor da área.

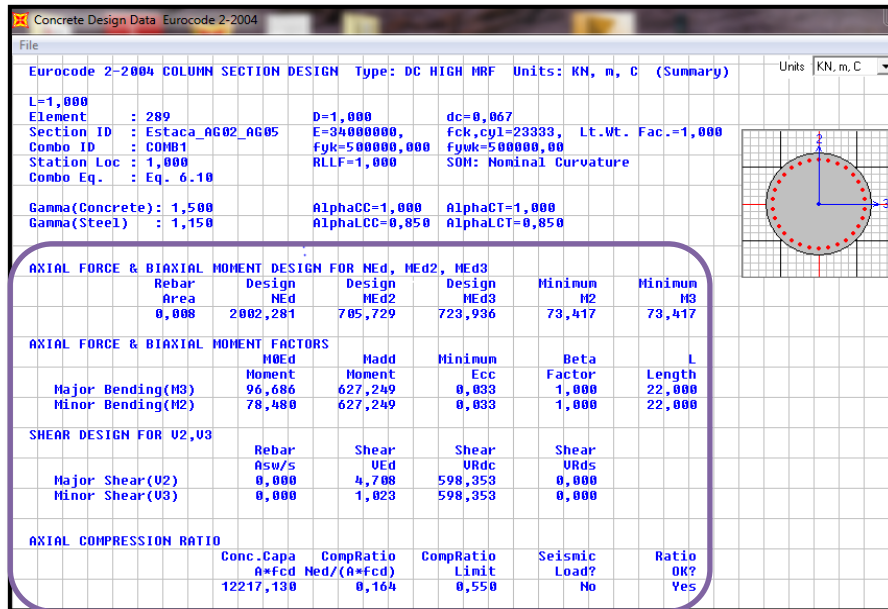


Figura 5.11 - Verificação das estacas.

5.4.3.3.4 Armadura da sapata

✓ Armadura da laje da sapata

Para o cálculo da armadura da laje da sapata, folhas da disciplina de Betão Estrutural II [19]:

Dados:

$$Msd = 3118,990 \text{ kN.m/m}$$

$$z = 0,9 d1$$

$d1 = 3\text{m}$, pela fundação possuir uma base grande a altura fica $d = 2,90\text{ m}$

$$fyd = 435 \text{ MPa}$$

$$A_{s/m} = \frac{Msd}{(0,9 \times d1) \times fyd} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

$$A_{s/m} = \frac{3118,990}{(0,9 \times 2,90) \times 43,5} = 27,47 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Após o cálculo da armadura, seguiu-se a análise da área da armadura a partir da Figura 5.12.

TABELA DE ÁREAS FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO (cm ² /m)										
Diâmetro (mm)	Espaçamento (m)									
	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3
6	3.73	2.80	2.24	1.87	1.60	1.40	1.24	1.12	1.02	0.93
8	6.67	5.00	4.00	3.33	2.86	2.50	2.22	2.00	1.82	1.67
10	10.53	7.90	6.32	5.27	4.51	3.95	3.51	3.16	2.87	2.63
12	15.07	11.30	9.04	7.53	6.46	5.65	5.02	4.52	4.11	3.77
16	26.80	20.10	16.08	13.40	11.49	10.05	8.93	8.04	7.31	6.70
20	41.87	31.40	25.12	20.93	17.94	15.70	13.96	12.56	11.42	10.47
25	65.47	49.10	39.28	32.73	28.06	24.55	21.82	19.64	17.85	16.37
32	107.20	80.40	64.32	53.60	45.94	40.20	35.73	32.16	29.24	26.80

Figura 5.12 - Área da armadura.

Concluindo-se que a área adaptada será de 29,24. Assim, com recurso à Figura 5.12, obtém-se o diâmetro de 32 mm e um espaçamento de 0.275 m dos varões de aço, especificamente: $\varnothing 32 // 27,5$ (cm).

✓ **Armadura da estaca**

Na Figura 5.13, estão representados os valores das armaduras das estacas retirados do SAP 2000, obtendo-se portanto a área de armadura em cada estaca.

Eurocode 2-2004 COLUMN SECTION DESIGN Type: DC HIGH MRF Units: KN, cm, C (Summary)						
L=100,000						
Element	: 291	D=100,000	dc=6,703			
Section ID	: Estaca_AG02_AG05	E=3400,000	fck,cyl=2,333	Lt.Wt. Fac.=1,000		
Combo ID	: COMB1	Fyk=50,000	fywk=50,000			
Station Loc	: 100,000	RLLF=1,000	SOM: Nominal Curvature			
Combo Eq.	: Eq. 6.10					
Gamma(Concrete)	: 1,500	AlphaCC=1,000	AlphaCT=1,000			
Gamma(Steel)	: 1,150	AlphaLCC=0,850	AlphaLCT=0,850			
AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN FOR NEd, MEd2, MEd3						
	Rebar Area	Design NEd	Design MEd2	Design MEd3	Minimum M2	Minimum M3
	78,540	1963,011	69368,178	71800,934	7197,707	7197,707

Figura 5.13 - Folha Excel da armadura da estaca.

Tendo em consideração o resultado obtido de 78,540 cm² e a partir da Figura 5.14, conclui-se qual a área da secção de varões que se deve utilizar, como também quantos varões serão necessários.

Áreas de secções de varões [cm ²]												
Ø	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	0.28	0.57	0.85	1.13	1.41	1.70	1.98	2.26	2.54	2.83	3.11	3.39
8	0.50	1.01	1.51	2.01	2.51	3.02	3.52	4.02	4.52	5.03	5.53	6.03
10	0.79	1.57	2.36	3.14	3.93	4.71	5.50	6.28	7.07	7.85	8.64	9.42
12	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.79	7.92	9.05	10.18	11.31	12.44	13.57
16	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.10	20.11	22.12	24.13
20	3.14	6.28	9.42	12.57	15.71	18.85	21.99	25.13	28.27	31.42	34.56	37.70
25	4.91	9.82	14.73	19.63	24.54	29.45	34.36	39.27	44.18	49.09	54.00	58.90
32	8.04	16.08	24.13	32.17	40.21	48.25	56.30	64.34	72.38	80.42	88.47	96.51

Figura 5.14 - Áreas de secções de varões, (cm²).

A área que se aproxima à obtida é a de 80,42 cm², sendo esse o valor adotado, o que equivale a uma armadura de 10 varões de aço com diâmetro de 32 mm.

✓ **Cálculo da fundação do aerogerador AG01**

Como já mencionado, o parque eólico do caso de estudo é constituído por dois tipos de fundações para os aerogeradores, o que difere é o comprimento das estacas. Para o aerogerador AG01 explicitarei o processo de execução no Anexo C e seguidamente apenas irei citar e comentar os resultados.

A deformada obtida por aplicação do programa de cálculo automático SAP 2000 é a apresentada na Figura 5.15.

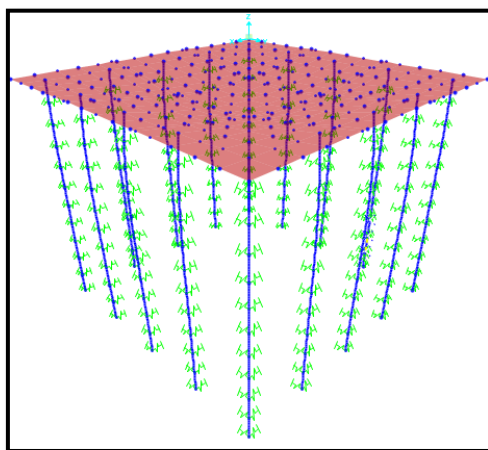


Figura 5.15 - Deformação da fundação, 11m.

Pela análise da Figura 5.15, conclui-se que a base da sapata possui igualmente uma deformação convexa e simétrica em relação aos limites da sapata. As estacas exibem também uma deformação côncava seguindo o sentido da deformação da sapata.

Os diagramas dos momentos fletores em OX (Figura 5.16 (a)) e em OY (Figura 5.16 (b)) apresentam valores mais elevados no centro da sapata. O momento mínimo é de -561,183 kN.m/m e o momento máximo é de 3148,537 kN.m/m.

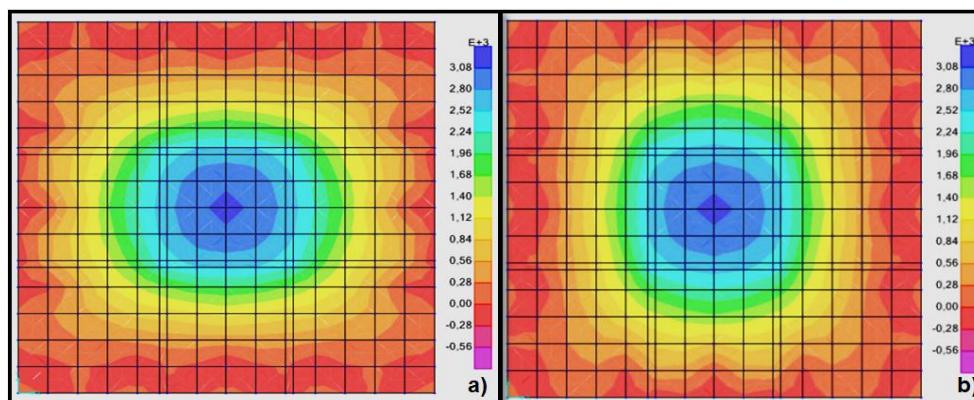


Figura 5.16 - Representação dos momentos: a) OX; b) OY.

Segue-se o dimensionamento das armaduras das estacas da fundação do AG01, que tal como nas estacas dos outros aerogeradores apresentam resultado em cor laranja, Figura 5.17, ou seja, também suportam o peso que lhes é solicitado.

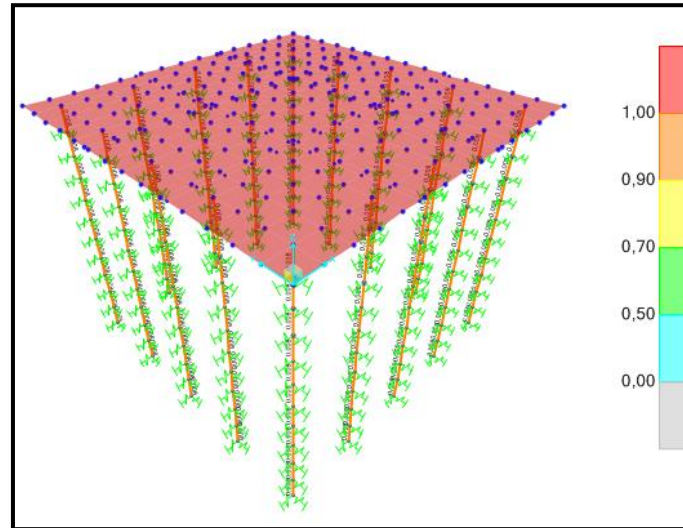


Figura 5.17 - Dimensionamento das armaduras nas estacas.

✓ **Estado Limite da Capacidade Resistente do Terreno para a fundação do AG01:**

Na Figura 5.18 pode-se observar a estaca em estudo.

Dados:

$$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Sondagem S1} \rightarrow \phi'_{\text{médio}} = 35^\circ$$

$$\text{Sondagem S2} \rightarrow \phi'_{\text{médio}} = 34^\circ$$

Valor característico, considerando os resultados correspondentes a todos os ensaios efetuados: $\phi'_k = 33^\circ$

$$F_{\text{vertical}} = 2385,832 \text{ kN}$$

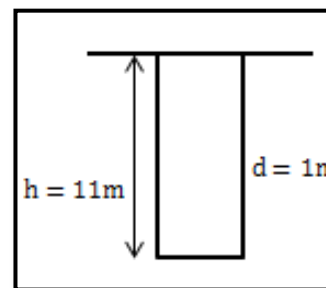


Figura 5.18 - Estaca com 11m de comprimento.

Verificação da segurança:

$$F_{cd}(3317,56) < R_{cd}(4721,98) \rightarrow \text{Verifica}$$

Pela verificação do estado limite último de compressão, flexão e por último a verificação transversal, Figura 5.19, confirma-se que estão cumpridas todas as verificações necessárias.

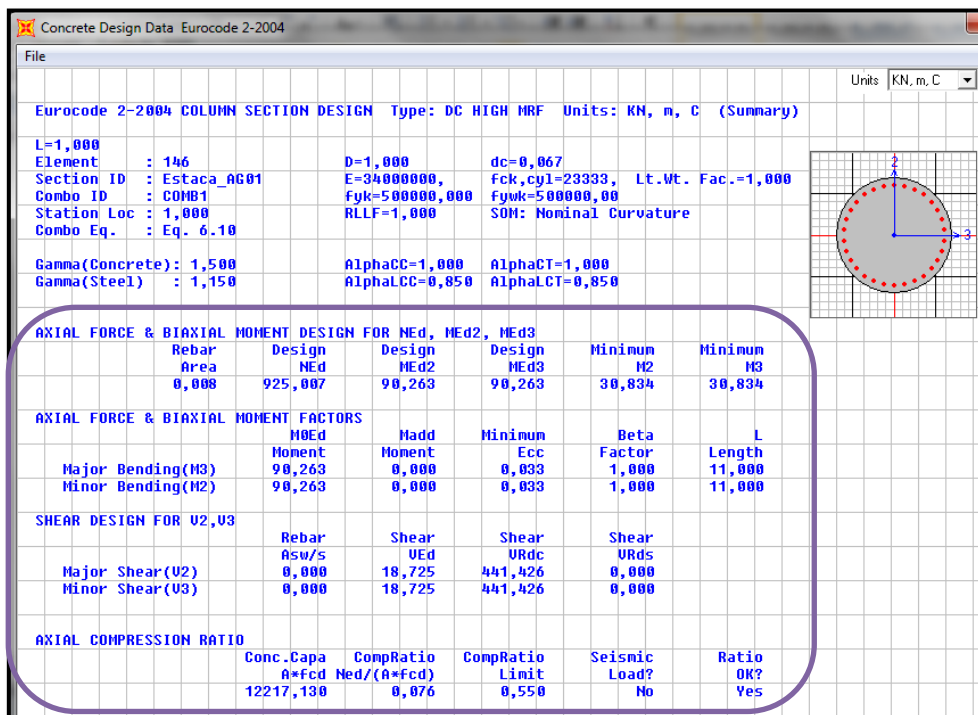


Figura 5.19 - Verificação das estacas AG01.

- ✓ Armadura da sapata
 - Armadura da laje da sapata

O resultado do cálculo da armadura da laje da sapata é: $A_{s/m} = 27,73 \text{ cm}^2/\text{m}$, concluindo-se que a área adaptada será de $29,24 \text{ cm}^2/\text{m}$, o que tal como no caso do AG02 ao AG05 resulta num diâmetro de 32 mm e um espaçamento de 0.275 m, especificamente: $\emptyset 32//27,5 \text{ (cm)}$.

✓ Armadura da estaca

Eurocode 2-2004 COLUMN SECTION DESIGN Type: DC HIGH MRF Units: KN, cm, C (Summary)						
L=100,000						
Element : 146	D=100,000	dc=6,783				
Section ID : Estaca_AG01	E=3400,000	fck,cyl=2,333	Lt.Wt. Fac.=1,000			
Combo ID : COMB1	Fyk=50,000	Fyw=50,000				
Station Loc : 100,000	RLLF=1,000	SOM: Nominal Curvature				
Combo Eq. : Eq. 6.10						
Gamma(Concrete): 1,500	AlphaCC=1,000	AlphaCT=1,000				
Gamma(Steel) : 1,150	AlphaLCC=0,850	AlphaLCT=0,850				
AXIAL FORCE & BIAXIAL	MOMENT DESIGN FOR	MEd, MEd2, MEd3				
Rebar	Design	Design	Design	Minimum	Minimum	
Area	NEd	MEd2	MEd3	M2	M3	
78,540	925,007	9026,253	9026,253	3083,358	3083,358	

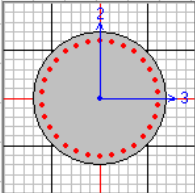


Figura 5.20 - Excel da estaca.

Como podemos observar (Figura 5.20), o resultado obtido foi de 78,540 cm², o mesmo que nos aerogeradores de AG02 a AG05, pelo que a área que se aproxima à obtida também é de 80,42 cm², o que equivale a uma armadura de 10 varões de aço com 32 mm de diâmetro.

5.5 Plataformas para montagens dos aerogeradores

As plataformas de trabalho localizadas nos pontos de implantação dos aerogeradores foram projetadas por forma a auxiliar a montagem dos aerogeradores, e eventuais operações de grande manutenção/reparação. É essencial que as dimensões mínimas da plataforma abranjam um espaço suficiente para dispor os componentes principais dos aerogeradores, devendo garantir-se espaço livre para que as gruas se possam movimentar durante a execução dos trabalhos. Para reduzir impacto visual é fundamental que as plataformas ocupem o menor espaço possível [15].

As dimensões da plataforma são indicadas pelo fabricante do aerogerador. No caso do presente estudo, as dimensões da plataforma foram de 35 metros x 40 metros o que equivale a uma área de 1400 m² [16].

No que concerne à construção da plataforma seguiram-se os procedimentos indicados no capítulo 3.5.1 [15].

5.6 Montagem do parque

Após concluída a plataforma, a fundação e a montagem da torre, deu-se início à montagem do aerogerador [2].

Antes da montagem do aerogerador procedeu-se à montagem da torre (pré-fabricada), transportada para o local em vários troços através de camiões de transporte especiais. Seguidamente é montada a cabine, que dependendo do seu peso poderá ser montada com ou sem os equipamentos do seu interior, porque em alguns casos a cabine sem os elementos pode chegar a pesar 90 toneladas o que dificulta a sua elevação e instalação [2].

Por fim foram instaladas as pás com 50 metros de comprimento. Por terem dimensões apreciáveis e por possuírem um peso individual entre 60 kN e 100 kN não é possível por razões de segurança, proceder à elevação e à instalação das pás com velocidades de vento superiores a 10 m/s [2].

5.7 Recuperação das áreas afetadas

Após a conclusão dos trabalhos de construção civil e da montagem dos aerogeradores, segue-se a recuperação paisagística nas áreas intervencionadas, nomeadamente na plataforma de montagem dos aerogeradores (exceção de uma zona restrita em redor do aerogerador para a circulação de uma viatura, a zona afetada para a construção do ramal interno de ligação do parque, como também as áreas de construção das valas para a instalação dos cabos elétricos) [16].

No que respeita à recuperação paisagística, o principal objetivo destina-se a minimizar o impacto paisagístico. Assim, interessa restabelecer os solos prevenindo que estes estejam demasiado tempo descobertos, submetidos a chuvas intensas e a ventos fortes, resguardando possíveis ações erosivas, e recolocar a vegetação natural, após a reposição de terra vegetal [16].

No âmbito da recuperação paisagística destacam-se algumas tarefas [16]:

- ✓ Nas áreas degradadas pelas obras será utilizada a camada superficial de solo existente nas áreas a desmatar e a decapar, sendo antes conduzidas para um depósito temporário;
- ✓ Será assegurado desde o início que o depósito dos resíduos, ainda que temporário, será encaminhado para o seu destino mais adequado;
- ✓ Irá ser realizada nas áreas afetadas pela obra a descompactação do solo;

- ✓ A morfologia do terreno será reestabelecida tanto quanto possível;
- ✓ Nas áreas atingidas pela obra irão também ser consideradas as características fitossociológicas da região, e as condições edáficas e ecológicas nas ações de recuperação da vegetação, tendo em especial atenção zonas com recursos de água, frentes de linhas de água e zonas com risco de erosão;
- ✓ Por fim as construções provisórias, resíduos, entulhos e restantes materiais deverão ser removidos da obra.

5.8 Planeamento

Na construção do parque eólico o planeamento é um elemento essencial, pelo elevado número de empreiteiros e subempreiteiros envolvidos e pela perda de negócio no caso de atrasos [2].

No planeamento é primordial que seja identificado o caminho crítico e que sejam identificadas as atividades críticas e as datas chave do projeto [2].

O planeamento inicia-se com a data de assinatura do contrato entre o Dono-de-Obra e o empreiteiro geral [2].

De seguida, e como primeira tarefa é necessário a preparação e a subcontratação. Será realizada a revisão do projeto de execução na sua globalidade, i.e.: execução dos acessos, fundações e valas de cabos, subestação e edifício de comando [2].

O empreiteiro geral terá um prazo para apresentar evidências das subcontratações que efetuou, eventualmente dos trabalhos de construção civil, ou de outras especialidades, bem como da contratação das gruas, do transporte, das equipas de montagem e de fornecimento de equipamentos [2].

Seguidamente inicia-se a construção civil: execução de acessos, abertura de valas para cabos, escavação, betonagem das sapatas e construção do edifício de Comando e da Subestação. Ainda nesta tarefa, imediatamente após a escavação e antes da execução da armadura de fundação, deverá estar concluída a entrega dos anéis de fundação para todas as sapatas dos 5 aerogeradores [2].

A parte elétrica das torres eólicas, nomeadamente a colocação de cabos de média tensão (MT) nas valas e a colocação do equipamento elétrico na Subestação e Edifício de Comando, decorre durante e após a construção civil, em coordenação com a tarefa

anterior. É relevante que nesta fase seja garantida a entrega do transformador principal, pelo que normalmente os prazos são longos [2].

Seguidamente é realizada a montagem dos aerogeradores, em que por norma, são montados dois aerogeradores por semana. Para além da montagem, é também reavaliado o prejuízo ou a rentabilidade do projeto em execução, que apenas será conseguido com a entrega do equipamento atempadamente. Para garantir que a obra não estagne, é essencial que haja uma coordenação na entrega dos equipamentos (pás, torres, cabines e transformadores) com as equipas de transporte e de montagem [2].

Por fim, é primordial que a conclusão dos trabalhos elétricos, de construção civil e da montagem dos aerogeradores, coincidam com a data de ligação dos aerogeradores à rede elétrica nacional. É uma data importante porque a tarefa seguinte necessita que o parque esteja na íntegra ligado à rede nacional de transporte [2].

Por norma a data de conclusão é estabelecida entre o fabricante dos aerogeradores e o Dono-de-Obra aquando os aerogeradores estiverem comissionados. Contudo a empreitada não se encontra finalizada pelo que ainda é necessário verificar a fiabilidade dos aerogeradores recorrendo a um teste de funcionamento com a duração mínima de 240 horas [2].

Já na parte final e para que o parque seja entregue provisoriamente ao Dono-de-Obra, é realizada a primeira manutenção dos 5 aerogeradores e a entrega de toda a documentação técnica [2].

Por último e para que a entrega seja considerada definitiva, o empreiteiro geral deverá corrigir pequenas inconformidades num prazo estabelecido (em geral 60 dias) [2].

Na Figura 5.21 é apresentado o planeamento das atividades de construção do parque eólico.

Actividades	Duração									
	1º Mês	2º Mês	3º Mês	4º Mês	5º Mês	6º Mês	7º Mês	8º Mês	9º Mês	10º Mês
Estaleiro										
Implantação do estaleiro	■									
Aerogeradores										
Abertura das fundações			■	■	■	■	■			
Execução das sapatas dos aerogeradores					■	■	■	■		
Montagem dos aerogeradores								■	■	
Comissionamento dos aerogeradores									■	
Vias de acesso e valas de cabos										
Vias de acesso e plataformas		■	■	■						
Valas de cabos					■					
Edifício de Comando e Subestação										
Construção Civil		■	■	■	■	■				
Instalações eléctricas					■	■				
Linha eléctrica										
Linha aérea a 50 KV		■	■	■	■	■				
Recuperação das áreas afectadas										
Trabalhos de recuperação paisagística								■	■	■

Figura 5.21 – Planeamento do Parque Eólico Industrial.

5.9 Orçamento

O orçamento do parque eólico deverá englobar detalhadamente todos os custos praticados. No presente caso de estudo, contabiliza-se o preço do parque para apenas um aerogerador, tendo os preços atribuídos sido fornecidos pelos fabricantes. A Tabela 5.5 apresenta de uma forma sucinta os parâmetros principais orçamentados.

Tabela 5.5 - Orçamento do Parque Eólico.

Estaleiro	Distribuído nos vários itens
Acessos	68.075,89 €
Plataformas e drenagem perimetral das fundações	13.117,31 €
Torre Eólica	1.100.000 €
Maciço para a torre meteorológica permanente	16.552,71 €
Edifício de comando e subestação	289.823,20 €
Fornecimentos de equipamentos pelas Obras	6.759,23 €
Recuperação Paisagística	9.898,37 €
Total (1 aerogerador)	1 504 226,71 €

Neste sentido, e como conclusão o custo unitário por aerogerador atinge o valor de 1 504 226,71 €.

6 Conclusão

O trabalho desenvolvido possibilitou uma profunda compreensão da temática associada à construção de um parque industrial de produção eólica.

A produção de energia eólica no mundo está em franca expansão. Pelo seu carácter renovável apresenta-se cada vez mais como uma solução para variações de preço dos combustíveis fósseis (com relevância para o petróleo), para a escassez previsível desses combustíveis em poucas décadas e para a redução da poluição a nível global e das emissões de CO₂ que estão na origem das alterações climáticas.

Numa primeira fase deste estudo foi realizada pesquisa sobre a evolução da energia eólica no Mundo, na Europa e em Portugal. Seguidamente desenvolveu-se a problemática sobre a construção de parques eólicos, focando todos os aspetos essenciais, desde a escolha do local até à execução da obra. Ainda acerca da caracterização do local de implementação do parque eólico industrial e a sua constituição, foi apresentado o modelo de cálculo da potência eólica de uma turbina, e detalhou-se o estudo geológico/geotécnico, por constituírem elementos determinantes no processo decisório de construção de um parque eólico. Caracterizaram-se as questões associadas às vias de acesso, e referiram-se todas as infraestruturas a considerar na execução do parque eólico. Foram descritos os trabalhos de eletricidade a considerar, salientando-se o contributo da componente de construção civil para a boa execução das infraestruturas elétricas (abertura de valas, subestação e edifício de comando).

Posteriormente, aplicaram-se todos os pontos supramencionados a um caso de estudo - um parque eólico em Tocha. Detalhou-se o estudo da fundação das torres eólicas dos aerogeradores AG01 a AG05, tendo sido apresentada uma solução de fundação profunda (considerando o tipo de solo de fundação) para duas situações: estacas em betão armado com o comprimento de 22 m e com o comprimento de 11 m. Para o cálculo da fundação recorreu-se ao programa de cálculo SAP 2000, cujos pormenores se apresentaram.

Por fim, apresentou-se o planeamento da obra e o orçamento. O planeamento é essencial para um correto acompanhamento da obra e para que as tarefas sejam concluídas atempadamente. O orçamento é decisivo aquando da tomada de decisão quanto à construção do empreendimento.

Durante a execução do presente trabalho, tive a oportunidade de consolidar os conhecimentos adquiridos e a possibilidade de aprender muitos outros. Desenvolvi capacidade de pesquisa, adquiri conhecimentos sólidos sobre o estado da energia eólica no Mundo, na Europa e em Portugal e compreendi a multiplicidade tecnológica envolvida na construção de um parque eólico industrial. Pude desenvolver conhecimentos de Mecânica de Solos e de Estruturas, com especial ênfase nos estudos geológico/geotécnicos e na aplicação de programa de cálculo automático ao dimensionamento de sapatas de fundação e estacas.

Adicionalmente, desenvolvi competências em planeamento de uma obra e adquiri conhecimento sobre os custos associados ao parque eólico industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rui M.G. Castro, Energias renováveis e produção descentralizada – introdução à energia eólica, 4ª ed, IST, Março de 2009 (último acesso em 11-09-2013).
- [2] António Monteiro Pinho, Gestão de Projetos de Parques Eólicos, FEUP, Junho de 2008 (último acesso em 25-09-2013).
- [3] Frederico Jorge Mendes Fonseca, Sistema de Controlo e Exploração de um Parque Eólico, FEUP, Junho de 2008 (último acesso em 25-07-2013).
- [4] EDP Renováveis, relatório e contas, 2011 (último acesso em 01-06-2013).
- [5] Wind in Power, 2012 European Statistics, February 2013 (último acesso em 03-06-2013).
- [6] Global Wind Energy Council, Global Wind Statistic-2012, 11 the February 2013 (último acesso em 13-06-2013).
- [7] EDP, relatório e contas, 2011, (último acesso em 20-09-2013).
- [8] André Alexandre da Cunha Araújo, Análise da Fiabilidade de um Parque Eólico, FEUP, Junho de 2008, (último acesso em 13-08-2013).
- [9] Neo Energia – José Diaz, Formación de Promotores de Renovables, Marzo 2008, (último acesso em 25-08-2013).
- [10] Agostinho Paulo Ferreira Pinto, Projeto e Operação de Parques Eólicos com Excedente de Potência Instalada, FEUP, Dezembro de 2001, (último acesso em 11-09-2013).
- [11] Wind Turbine Power Calculations - RWE npower renewables , Mechanical and Electrical Engineering, Power Industry, (último acesso em 12-05-2013).
- [12] Neo energia, Geological-Geotechnical study for a Wind Farm, 7 the November the 2008, (último acesso em 19-06-2013).
- [13] Pedro Miguel Coimbra Peixoto Amorim, Análise e Melhoria dos Rendimentos das Máquinas num Parque Eólico, FEUP, Julho de 2008, (último acesso em 29-07-2013).
- [14] Parque Eólico de Videmonte, em fase de estudo prévio, Março 2004, (último acesso em 01-10-2013).

[15] Irina Cláudia Borges Monteiro, Parques Eólicos – O caso de estudo do PE de Cabeço de Rainha II, Universidade de Aveiro, Ano 2010, (último acesso em 03-10-2013).

[16] Parque Eólico do Douro Sul, S.A., Estudo de Incidências Ambientais do Parque Eólico de Três Marcos, Relatório final, Janeiro de 2013, (último acesso em 15-09-2013).

[17] Miguel Ângelo Batata Candeas, Projeto de fundação e Estrutura de um Edifício destinado a Pavilhão Gimnodesportivo, ISEL, Novembro 2011, (último acesso em 30-09-2013).

[18] Estruturas de Suporte e Fundações II, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, IST, (último acesso em 04-10-2013).

[19] Prof. António Sousa Gorgulho – Folhas da disciplina de Betão Estrutural II, versão atualizada segundo o EC2, (último acesso em 10-10-2013).

Sites

[s1] <http://www.linkatual.com.br/protocolo-kyoto.html> (último acesso em 05-05-2013).

[s2] <http://www.explicatorium.com/Energia-eolica.php> (último acesso em 10-06-2013).

[s3] <http://www.dw.de/energia-e%C3%B3lica-deve-superar-a-gerada-por-usinas-nucleares-no-mundo-at%C3%A9-2020/a-15918962> (último acesso em 30-07-2013).

[s4] <http://energiasap.blogspot.pt/2007/10/energia-elica-desde-os-tempos-mais.html> (último acesso em 27-09-2013).

[s5] <http://windcoalition.org/wind-energy/history-of-wind-energy/> (último acesso em 16-08-2013).

[s6] <http://www.windenergyfoundation.org/about-wind-energy/history> (último acesso em 12-06-2013).

[s7] http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index_en.cfm?pg=research-wind (último acesso em 22-07-2013).

[s8] http://antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/intro_eolica.php (último acesso em 29-05-2013).

-
- [s9] <http://www.planetseed.com/pt-br/relatedarticle/alternativas-aos-combustiveis-fosseis> (último acesso em 29-06-2013).
- [s10] <http://hlagido.wordpress.com/tag/aquecimento-global/> (último acesso em 09-06-2013).
- [s11] <http://www.rudzerhost.com/ambiente/estufa.htm> (último acesso em 17-07-2013).
- [s12] <http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/energia/noticias/o-mercado-da-energia-eolica-no-mundo> (último acesso em 19-06-2013).
- [s13] http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_production_and_supply_statistics#Main_tables (último acesso em 27-07-2013).
- [s14] <http://ventosdemudanca.webnode.com.pt/energia-eolica-em-portugal/> (último acesso em 15-08-2013).
- [s15] <http://e2p.inegi.up.pt/index.asp> (último acesso em 11-05-2013).
- [s16] http://www.eneop.pt/subcanais_n1.asp?id_subcanal_n1=170&id_canal=110 (último acesso em 14-05-2013).
- [s17] http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_e%C3%B3lica_em_Portugal (último acesso em 23-05-2013).
- [s18] http://pt.wikipedia.org/wiki/Energias_de_Portugal (último acesso em 24-06-2013).
- [s19] <http://www.edp.pt/pt/aedp/sobreaedp/marcaEDP/Pages/HistoriaMarca.aspx> (último acesso em 06-06-2013).
- [s20] <http://www.psi20.net/noticias/a-historia-da-edp/> (último acesso em 30-09-2013).
- [s21] <http://www.edpr.com/pt-pt/negocio/os-nossos-mercados/portugal/> (último acesso em 29-08-2013).
- [s22] <http://www.dinheirovivo.pt/Empresas/Artigo/CIECO054220.html> (último acesso em 29-09-2013).
- [s23] <http://www.edp.pt/pt/media/noticias/2013/Pages/UmaDasEmpresasMaiseticasDoMundo.aspx> (último acesso em 13-09-2013).
- [s24] <http://paginas.fe.up.pt/~ee00201/pagina4.htm> (último acesso em 13-08-2013).

- [s25] http://4.bp.blogspot.com/-Bj7F_pvBPIs/Ts1MQUXP0DI/AAAAAAAAAMU/K2gF1SbtCBQ/s1600/ins6.jpg (último acesso em 30-09-2013).
- [s26] <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/17/29/> (último acesso em 14-08-2013).
- [s27] <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/905994/1/7.1-%20XIII%20Estacas%20moldadas.pdf> (último acesso em 15-09-2013).
- [s28] <http://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/custo-comparativo/> (último acesso em 11-09-2013).
- [s29] <http://futuro.cm-cantanhede.pt/mcsite/Content/?MID=1&ID=1151#.Unh1NfnIYIR> (último acesso em 28-09-2013).
- [s30] <http://ecoreporter.abae.pt/index.php?p=trabalhos&s=view&u=a&n=1&id=218&sid=0&y> (último acesso em 30-09-2013)=2012 (último acesso em 23-08-2013).
- [s31] <http://aurinegra.wordpress.com/2010/10/08/bom-vento-traz-investimentos-a-tocha/> (último acesso em 22-08-2013).
- [s32] <https://wiki.csiamerica.com/display/sap2000/Home> (último acesso em 25-09-2013).
- [s33] <http://www.yorkblog.com/yorktownsquare/2009/01/05/gordon-freierichs-windmill/> (último acesso em 26-07-2013).
- [s34] <http://saofranciscoagora.blogspot.pt/2011/04/maior-parque-eolico-do-sudeste-produz.html> (último acesso em 12-09-2013).
- [s35] <http://www.grupodarcypacheco.com.br/equipamento/lm-1300> (último acesso em 30-10-2013).
- [s36] <http://minde-online.blogspot.pt/2009/04/parque-eolico-chao-falcao-3.html> (último acesso em 11-10-2013).
- [s37] <http://nextbigfuture.com/2011/04/20-megawatt-wind-turbine-designs-based.html> (último acesso em 13-10-2013).
- [s38] <http://resteadesol.blogspot.pt/2011/03/ando-lutar-contramoinhos-de-vento.html> (último acesso em 19-10-2013).

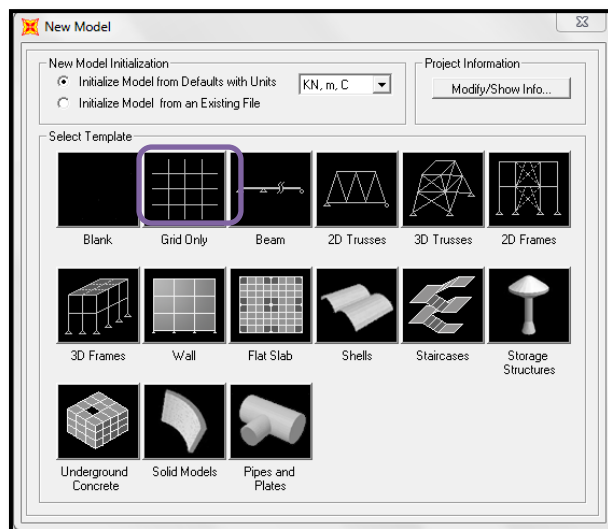
[s39] <http://1.bp.blogspot.com/-HWW4DkXFoV0/UJCvxLUqmwI/AAAAAAAAAtM/UhtagKgmWs/s1600/eletroe%C3%B3lica2.jpg> (último acesso em 30-10-2013).

[s40] <http://www.cranestodaymagazine.com/features/wind-power/image/wind-power-7.html> (último acesso em 01-11-2013).

ANEXOS

ANEXO A - Cálculo da fundação dos aerogeradores de AG2 a AG5

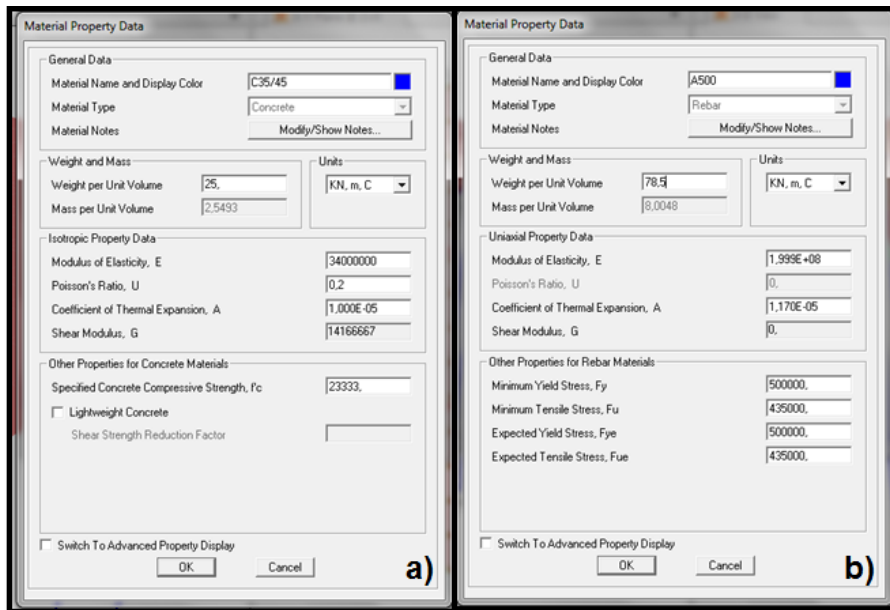
Inicialmente foi selecionado o tipo de modelo a utilizar e definidas as unidades a considerar durante a execução da fundação, através do programa de cálculo. Como se observa na figura, o modelo que mais se adequa e por isso o utilizado foi o “*Grid Only*”.Relativamente às unidades foram alteradas para KN.m.



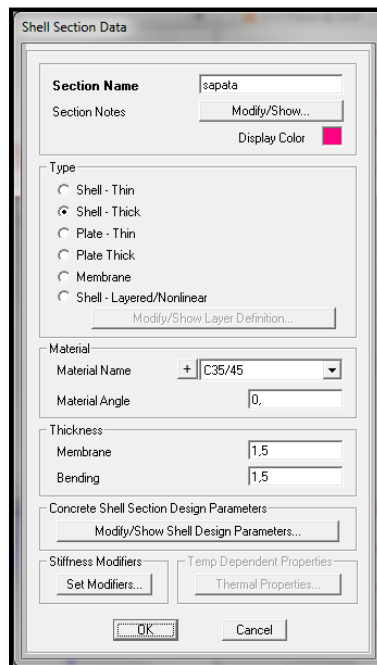
Seguidamente definiu-se os eixos da “Grid” e os materiais. Os limites da “Grid” correspondem às dimensões da sapata.

Foram utilizados os materiais mencionados anteriormente (betão e o aço). Nas imagens que se seguem é possível observar os dados das propriedades dos materiais. No que concerne ao betão é necessário introduzir: tipo de material, as unidades, o peso volúmico do betão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e o f_{cd} , figura (a).

Relativamente ao aço, os dados das propriedades dos materiais necessários são: tipo de material, peso volúmico do aço, módulo de elasticidade, f_{yk} e f_{yd} , figura (b).

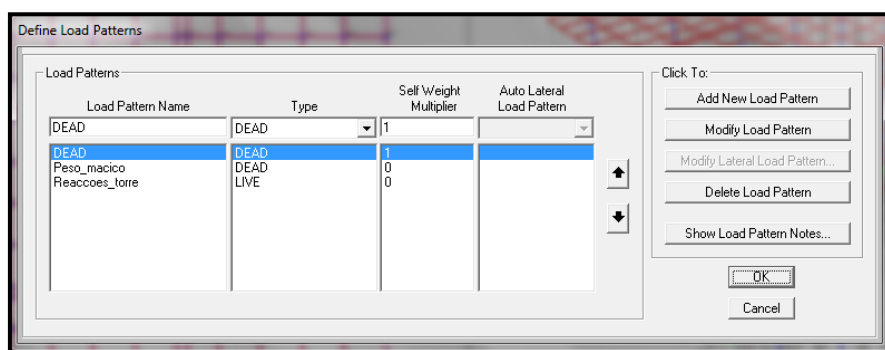


Com ajuda da ferramenta apresentada na figura que se segue, inicia-se a construção da sapata. Por se tratar de uma sapata com forma de secção trapezoidal em corte torna-se mais difícil a construção da própria no programa. Para maior facilidade, considerou-se inicialmente uma sapata de espessura 1,5 m e por fim procedeu-se à execução do pedestal (topo da sapata) a partir de cargas distribuídas.

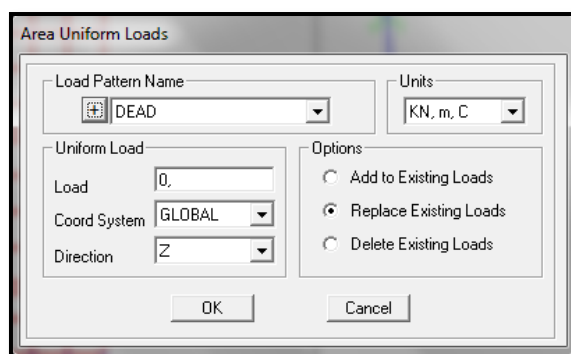


Antes da distribuição das cargas para o pedestal é imperativo definir as cargas que iremos utilizar ao longo do programa. Como mostra a seguinte figura, temos a designação das cargas, o tipo e o multiplicador do peso próprio.

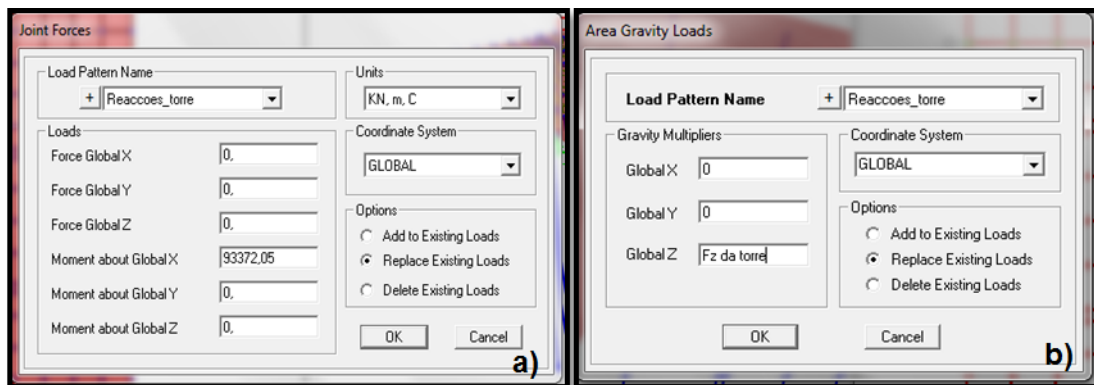
O “DEAD”, representa o peso próprio da sapata. Na secção do multiplicador do peso próprio o valor que considerou-se 1, o que significa que estamos a contar com o peso próprio da sapata. Para que o mesmo não seja contabilizado mais do que uma vez o valor do multiplicador do peso próprio no caso do “Peso_macico” e nas “Reações_torre” é 0.



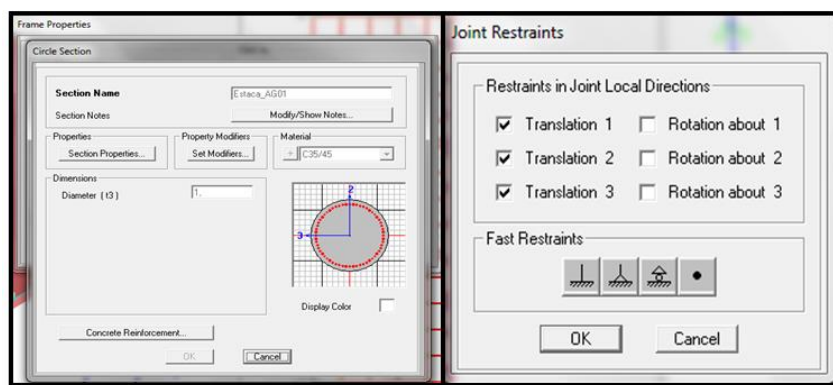
Posteriormente procede-se à aplicação das cargas distribuídas do pedestal. Para tal é imprescindível o cálculo do peso volúmico de cada secção. De seguida é seleccionada a área a que se destina o peso volúmico que pretendemos colocar e a partir da ferramenta apresentada na figura abaixo, é atribuído o valor do peso volúmico da secção em causa, e assim sucessivamente para todas as secções da sapata.



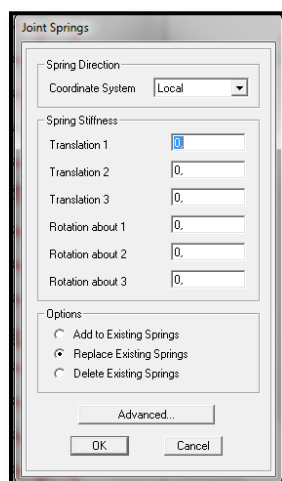
Com o auxílio das ações resultantes fornecidas pelo fabricante das torres eólicas em estudo são aplicadas as reações da torre na sapata. Foram utilizadas as ações mais desfavoráveis: $F_z = 7975,60$ KN (Figura (b)) e $M_{res} = 93372,05$ KN m (Figura (a)).



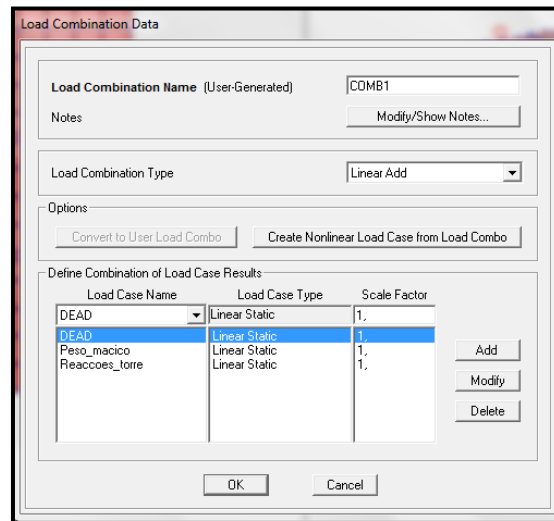
De seguida são introduzidas as estacas apoiadas, como mostra a seguinte figura.



Para impedir que as estacas se desloquem na vertical ou na horizontal, são inseridas molas nessas mesmas direções ao longo das estacas. As molas interseridas na sapata com auxílio da ferramenta “*Joint Springs*”, possuem uma rigidez de 20 000 kN/m. Esse valor é colocado a partir da ferramenta apresentada na seguinte figura.



Através da ferramenta “*Load Combination Data*” procede-se à combinação fundamental, que engloba as reações da torre e o peso próprio da estrutura que corresponde ao peso da sapata, peso das estacas e o peso do maciço (pedestal).



ANEXO B - Planta geral e de condicionantes da área de estudo

ANEXO C - Estado Limite da Capacidade Resistente do Terreno para AG01

a) Capacidade resistente:

a1) profundidade crítica, (Anexo C):

$$\phi'_k = 33^\circ \rightarrow \frac{D_c}{B} = 10 \leftrightarrow D_c = 10 \times 1,0 = 10\text{m}$$

a2) capacidade de resistência de ponta:

- tensão efetiva vertical à profundidade a que se encontra a ponta da estaca,
(comprimento de estaca no meio portante: $D_b = 11\text{m}$)

$$D_b(11\text{m}) > D_c(10\text{m}) \rightarrow \sigma'_{v\text{máx}} = \gamma \times D_c = 22 \times 10 = 220 \text{ KPa}$$

a3) fator de profundidade (Anexo C):

$$\phi'_{\text{médio}} = 33^\circ \rightarrow N_q = 38$$

a4) valor característico da pressão resistente de ponta:

$$q_{b,k} = \sigma'_{v} \times N_q = 220 \times 38 = 8360 \text{ kN/m}^2$$

a5) valor característico da capacidade resistente de ponta:

$$R_{b,k} = q_{b,k} \times A_p = 8360 \times \left(\pi \times \frac{1^2}{4} \right) = 6565,93 \text{ kN}$$

a6) capacidade resistente lateral

- valor de K (como o contato é com areia admite-se que há boa ligação com o fuste da estaca.)

$$K = K_0 = 1 - \sin 33^\circ = 0,45$$

- valor de δ (Anexo C)

$$\delta = \phi$$

-tensão resistente lateral

$$q_{s,k1} = \overline{\sigma'_v} \times k \times \tan \delta = \left[\left(\frac{1}{2} \times 220 \right) \times 0,45 \times \tan 33 \right] = 32,14 \text{ kN/m}^2$$

-valor característico da capacidade resistente lateral

$$R_{sk} = q_{s,k} \times A_s \leftrightarrow R_{sk} = 32,14 \times \pi \times 1 \times 11 = 1110,68 \text{ kN}$$

-valor de cálculo da capacidade resistente

$$R_{c,d} = \frac{1}{\gamma_{mod}} \left(\frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} \right) = \frac{1}{1,05} \left(\frac{6565,93}{1,6} + \frac{1110,68}{1,3} \right) = 4721,98 \text{ kN}$$

a7) valor de cálculo de força axial de compressão atuante

$$W = h \times \left(\pi \times \frac{\phi^2}{4} \right) \times \gamma_{betão} = 11 \times \left(\pi \times \frac{1^2}{4} \right) \times 25 = 215,98 \text{ kN}$$

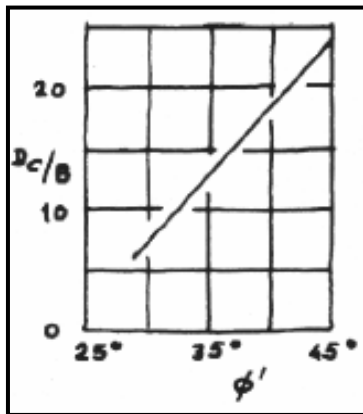
$$F_{cd} = 1,0 \times G + 1,3 \times Q = 1,0 \times 215,98 + 1,3 \times 2385,832 = 3317,56 \text{ kN}$$

a8) verificação da segurança em relação ao estado limite último por rutura do terreno de fundação devido à força axial de compressão:

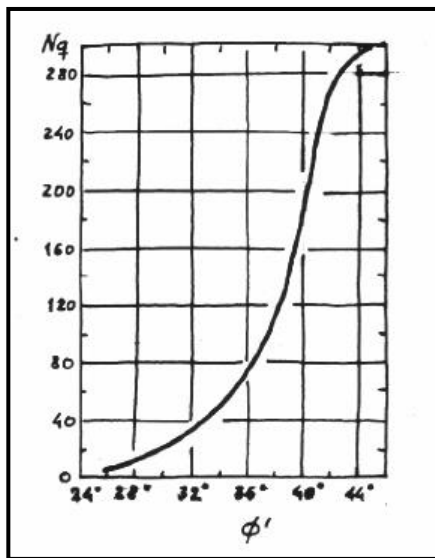
$$F_{cd}(3317,56) < R_{cd}(4721,98) \rightarrow \text{Verifica}$$

ANEXO D – Gráficos de auxílio ao cálculo da fundação

Profundidade crítica.



✓ **Coefficiente de profundidade, N_q .**



✓ **Angulo de resistência ao corte na interface estaca-areia**

Material da Estaca	δ
Betão (cravada)	$0,8 \phi'$ a $1,0 \phi'$
Betão (betonada no local)	$1,0 \phi'$
Madeira	$0,8 \phi'$ a $0,9 \phi'$
Aço liso	$0,5 \phi'$ a $0,7 \phi'$
Aço rugoso	$0,7 \phi'$ a $0,9 \phi'$
Aço corrugado	ϕ' da areia envolvente