



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TREBALL DE FI DE MÀSTER

Disseny geotècnic dels fonaments per a un parc eòlic a la Comunitat Foral de Navarra
(Espanya)

Presentat per

Benavent Benavent, Patricia

Per a l'obtenció del

Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Curs: 2019/2020

Data: Setembre 2020

Tutor: Martínez Ibáñez, Víctor



ÍNDEX

Document 1: Memòria

Memòria

Annexos:

01_02 Anàlisi crític de la informació geològica i geotècnica

02_02 Disseny geotècnic dels fonaments

Document 2: Plans

01_04 Situació i emplaçament

02_04 Situació aerogeneradors

03_04 Detall secció tipus

04_04 Secció tipus amb el perfil litològic

Document 3: Valoració econòmica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TREBALL DE FI DE MÀSTER

Disseny geotècnic dels fonaments per a un parc eòlic a la Comunitat
Foral de Navarra (Espanya)

Document 1: Memòria

Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Curs: 2019/2020

Autora: Benavent Benavent, Patricia

Tutor: Martínez Ibáñez, Víctor

Índex de figures

Figura 1: Localització parc eòlic	7
Figura 2: Pla situació del futur parc eòlic	7
Figura 3: Esquema secció pròpia proposada.....	8
Figura 4: Pressupost de les 5 cimentacions dels aerogeneradors	9
Figura 5: Acció vertical modificada pel moment torsor	13
Figura 6: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim	13
Figura 7: Factors parcial.....	15
Figura 8: Formulació per a verificar el lliscament	15
Figura 9: Capacitat de suport.....	16
Figura 10: Mòdul de rigidesa rotacional dinàmica	16
Figura 11: Mòdul de tallament dinàmic.....	16

0 Resum executiu

El present Treball de Fi de Màster denominat “Disseny geotècnic dels fonaments per a un parc eòlic a la Comunitat Foral de Navarra (Espanya)” consisteix en el desenvolupament d'un anàlisi geològic i geotècnic del terreny d'un parc eòlic, el disseny de les cimentacions dels aerogeneradors i l'estudi de la seua viabilitat econòmica.

Es verificarà que el disseny proposat compleix amb els modes de fallada geotècnics més comuns per a aquest tipus d'estructures: capacitat de suport, lliscament, rigidesa rotacional dinàmica i seients. Per un altra part, un dels principals aspectes d'aquest treball radica en la caracterització geotècnica del parc a partir tant de la investigació geotècnica i geològica realitzada (investigació en camp, assajos in situ, assajos de laboratori i tècniques geofísiques) com de diferent documentació de suport a partir d'un anàlisi crític. A més a més, es realitza una estimació econòmica per a poder valorar el disseny proposat dels fonaments.

A continuació es resumeix de forma detallada el procés seguit per a la realització d'aquest document.

En primer lloc, s'ha analitzat l'estat actual de la ubicació del parc eòlic, ubicat en la Comunitat Foral de Navarra. Més precisament entre els municipis de Lodosa i Sesma. Actualment, en la futura ubicació dels aerogeneradors no hi ha cap altra estructura construïda.

Una vegada realitzat l'anàlisi de la situació actual, s'ha caracteritzat el terreny on recolzaran els 5 aerogeneradors a partir d'una sèrie d'assajos de partida tant realitzats in situ com al laboratori. En aquest apartat s'han tractat i analitzat els paràmetres inicials i a partir d'ells, mitjançant unes sèries de correlacions s'han obtingut els paràmetres necessaris per al disseny de les cimentacions. Tanmateix, per al correcte tractament d'aquestes dades, s'han utilitzat diversos mètodes estadístics per a valorar si les dades dels assajos son representatives o no del terreny, en este cas format majoritàriament per macís rocós en diferents graus de meteorització. A més a més, s'exposen una sèrie de propostes per a millorar la campanya inicial de partida.

Una vegada realitzada la caracterització geotècnica i verificats els paràmetres necessaris per al disseny de les cimentacions es procedeix al seu càlcul estructural. Per a realitzar aquest pas, es parteix d'unes accions a la base de la torre de l'aerogenerador, les quals mitjançant les lleis de l'estabilitat estructural es calcularan a la base de la cimentació ponderades pels factors parcials corresponents de cada acció. Hi ha que destacar que la l'acció horitzontal H es veurà afectada i modificada pel moment torsor. Una vegada obtingudes les accions, es realitzen les verificacions geotècniques destacant la rigidesa rotacional dinàmica. Aquest mètode de fallada en el 90% de les estructures no es verifica. Tanmateix, l'aerogenerador és una estructura dinàmica deguda al moviment de les seues aspectes i, per tant, s'haurà de realitzar.

Finalment, definits i quantificats tots els paràmetres i càlculs anomenats prèviament, s'estudia la rendibilitat econòmica dels fonaments dels 5 aerogeneradors.

ÍNDIX

6 REFERÈNCIES.....20

ÍNDIX DE FIGURES.....	2
0 RESUM EXECUTIU.....	3
1 INTRODUCCIÓ.....	6
1.1 ANTECEDENTS.....	6
1.2 OBJECTE I ABAST.....	6
1.3 SITUACIÓ ACTUAL I DESCRIPCIÓ DEL PARC EÒLIC.....	6
1.4 IMPACTE AMBIENTAL.....	6
1.5 IMPACTE EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓ.....	6
1.5.1 Atmosfera.....	6
1.5.1 Geologia i geomorfologia.....	6
1.5.1 Qualitat de l'aigua.....	6
1.5.1 Vegetació i paisatge.....	6
1.6 CARACTERITZACIÓ DE L'ENTORN DE L'EMPLAÇAMENT, DESNIVELL, OBSTACLES I OMBRES.....	7
1.7 SITUACIÓ I EMLAÇAMENT.....	7
1.8 ESTUDIS PREVIS I DOCUMENTACIÓ DE PARTIDA.....	7
1.9 ESTUDI DE SOLUCIONS.....	8
1.10 DESENVOLUPAMENT DE LA SOLUCIÓ ADOPTADA.....	8
1.11 GEOMETRIA DE LA SECCIÓ I PERFIL LITOLÒGIC.....	8
1.12 PRESSUPOST.....	8
1.12.1 Definició de les unitats d'obra.....	8
1.12.2 Mesuraments.....	8
1.12.3 Quadres de preus.....	8
1.12.4 Pressupost.....	8
1.13 BENEFICIS DE LA SOLUCIÓ ADOPTADA DES DEL PUNT VISTA DEL DISSENY I ECONÒMIC.....	9
2 ANÀLISI CRÍTIC DE L'ESTUDI GEOLÒGIC I GEOTÈCNIC.....	11
2.1 GEOLOGIA.....	11
2.1 EXPANSIVITAT I KARSTIFICACIÓ.....	11
2.1 SISMICITAT.....	11
2.1 INVESTIGACIÓ EN CAMP.....	11
2.2 INVESTIGACIÓ AL LABORATORI.....	11
3 DETERMINACIÓ DE LES CÀRREGUES.....	13
4 VERIFICACIÓ MÈTODES DE FALLADA.....	15
4.1 LLISCAMENT.....	15
4.2 CAPACITAT DE SUPORT.....	15
4.3 RIGIDESA ROTACIONAL DINAÀMICA.....	16
4.4 SEIENTS.....	16
5 CONCLUSIONS.....	18

Capítol 1.

Introducció

1 Introducció

1.1 Antecedents

L'energia eòlica és aquella energia obtinguda a través del vent. Seguidament, aquesta es pot transformar mitjançant l'ús d'aerogeneradors que conformen un parc eòlic en energia elèctrica. Aquesta tècnica d'obtenció d'energia cada vegada és més utilitzada al mercat d' Espanya, concretament al nord del país. El seu ús s'ha vist incrementat degut a les conseqüències positives que té l'energia eòlica. A continuació s'anuncien aquests aspectes:

- Energia renovable i no contaminant
- Reducció de l'ús de combustible fòssil i per tant, disminució de les emissions que provoquen l'efecte hivernacle
- Inesgotable i disponible a tot el planeta
- No genera residus contaminants

Per tant es tracta d'una energia que contribueix al desenvolupament sostenible tant del nostre país com del món.

En Espanya, els primers aerogeneradors es van instal·lar al 1984. Des de l'any 2000, s'ha incrementat l'ús d'aquesta energia, i per conseqüència de la construcció d'aerogeneradors, degut al desenvolupament de la legislació basada en investigacions i inversions en aquest sector. Sobretot aquesta tècnica s'ha incrementat al nord d'Espanya, entre altres ubicacions a la Comunitat Foral de Navarra ja que reuneix una orografia òptima per a la seua execució.

D'aquesta manera, es vol fer ús de les condicions favorables per a la implantació d'aerogeneradors per a la construcció d'un parc eòlic format per 5 estructures a la Comunitat Foral de Navarra.

1.2 Objecte i abast

L'objecte del present Treball de Fi de Màster denominat "Disseny geotècnic dels fonaments per a un parc eòlic a la Comunitat Foral de Navarra (Espanya)" és el disseny de 5 aerogeneradors d'un parc eòlic realitzant prèviament un tractament de dades procedents tant d'assajos realitzats en el propi parc eòlic, és a dir, in situ, com assajos realitzats al laboratori.

El treball partirà d'un anàlisi crític de la informació geotècnica de partida: assajo de camp i assajos de laboratori procedents d'una campanya real. A més a més, es dissenyarà una campanya complementària en funció de les conclusions de l'anàlisi crític. A part, s'establiran unitats geotècniques que donen l'oportunitat de distingir els diferents emplaçaments des del punt de vista geotècnic i mitjançant un anàlisi s'elegirà el perfil litològic òptim per al disseny de les cimentacions. A continuació, es predimensionarà l'alternativa elegida amb les unitats geotècniques del model del terreny aconseguït. Finalment, es desenvoluparà el disseny geotècnic del detall dels fonaments i quedarà justificadament de manera tècnica, gràfica (plans) i valorada econòmicament.

1.3 Situació actual i descripció del parc eòlic

Un parc eòlic és una agrupació d'aerogeneradors que transformen l'energia eòlica en energia elèctrica. Poden localitzar-se tant en terra (*onshore*) com en el mar (*offshore*). El número d'aerogeneradors que conformen un parc pot ser molt diferent en funció de la superfície que es troba disponible i de les característiques del vent. En totes les ubicacions d'un parc eòlic es tindran períodes de calma total els quals es combinaran amb períodes de brisa sua i grans vents.

Actualment, la zona de la Comunitat Foral de Navarra disposa de diversos parcs eòlics. Tanmateix, degut a l'alta demanda d'energia, es proposa la realització d'un parc eòlic de 5 aerogeneradors en una ubicació on actualment són camps de cultiu.

1.4 Impacte ambiental

El tipus d'estructures que conformen un aerogenerador són elements visibles al paisatge, si no fora així, aquests no estarien situats de forma adequada des del punt de vista meteorològic. Com a conseqüència d'aquesta ubicació provoquen un impacte paisatgístic. Tot i això, la creació de parcs eòlics està subjecta a evitar problemes a la vegetació, evitar restaurar-la, intentar no modificar els camins per als vehicles...

A part de l'impacte ambiental mencionat anteriorment, també hi ha que tindre en consideració les afeccions que els parc eòlics poden causar a la flora i fauna, més en concret a les aus. A més a més, quan es localitza en zones urbanes, es deurà realitzar anàlisis de sorolls.

1.5 Impacte en la fase de construcció

1.5.1 Atmosfera

Durant la fase de construcció hi haurà un progressiu trànsit de vehicles i maquinària pesada necessària per a la construcció de les cimentacions i dels aerogeneradors. Aquests fets poden causar molèsties tant personals com a la fauna. Per altra banda, al llarg d'aquest període hi haurà focus d'emissions de pols generats pel moviment de terres i el trànsit dels vehicles citats.

1.5.1 Geologia i geomorfologia

Els moviments que es desenvoluparan al llarg de la fase de construcció poden provocar un augment de l'erosió del terreny.

1.5.1 Qualitat de l'aigua

Els aqüífers superficials i subterranis poden ser afectats pel moviment de terres i els lubricants que poden derramar-se del trànsit dels vehicles.

1.5.1 Vegetació i paisatge

Principalment, aquests impactes tenen lloc quan es produeix l'emplaçament per a la instal·lació dels aerogeneradors ja que es realitza el procés de desbrossament.

Respecte el paisatge, tindrà un gran impacte durant l'obra de cimentació degut a la revegetació del terreny afectat per les obres.

1.6 Caracterització de l'entorn de l'emplaçament, desnivell, obstacles i ombres

Per a optimitzar el rendiment de l'aerogenerador, i prolongar la seua vida útil, l'emplaçament deu estar ben exposat al vent i contar amb un baix grau de turbulències (poca rugositat). En general, quan més pronunciada siga la rugositat del terreny major serà la paralització que pot sofrir el vent. D'aquesta manera, ubicar un parc eòlic a uns camps (fora de la zona urbana) obtindrà millors benefici que localitzar-lo a una ciutat.

1.7 Situació i emplaçament

El parc eòlic objecte d'aquest treball de fi de màster es troba ubicat a 3,5 km de Lodosa i 6 km de Sesma, formant part així de la Comunitat Foral de Navarra (Espanya). Està format per 5 aerogeneradors amb turbines de potència cada una de 2000 kW.

Font: Google maps



Figura 1: Localització parc eòlic

Font: Google maps

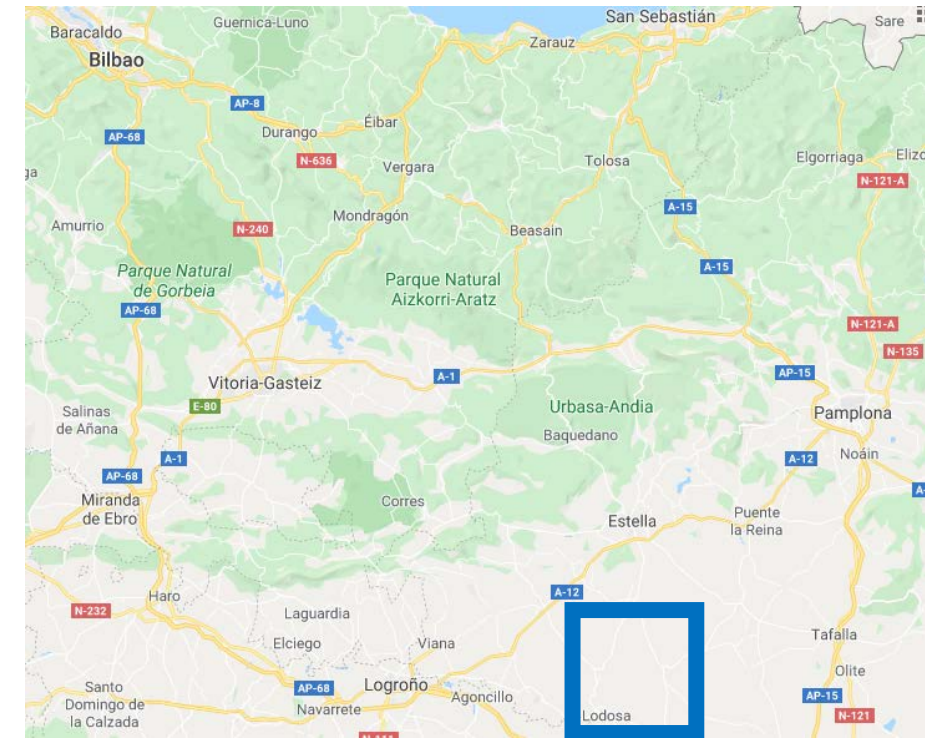


Figura 2: Pla situació del futur parc eòlic

A més a més, comentar que es troba situat al marge esquerre d'un dels principals rius d'Espanya, el riu Ebre.

1.8 Estudis previs i documentació de partida

A partir de diferents estudis estadístics s'ha obtingut un increment en l'ús de l'energia a la Comunitat Foral de Navarra. Per tant, s'ha decidit realitzar un altre parc eòlic per així incrementar l'oferta d'aquesta. A més a més, per a la redacció del present estudi, s'ha disposat de la documentació exposada a continuació.

S'ha realitzat una campanya geotècnica real de la localització del parc eòlic d'on s'ha pogut analitzar assajos, tant in situ com al laboratori, per a poder així realitzar la caracterització del terreny i seguidament el disseny dels fonaments dels aerogeneradors.

Els assajos que es disposen són:

- 5 sondejos de rotació
- 10 sondatges mecànics de reconeixement
- 34 SPT: assajos de penetració dinàmica
- 18 PLT: assajos de resistència puntual
- .23 assajos de sísmica passiva
- 26 assajos de resistència a compressió uniaxial

- 15 determinació de la densitat aparent
- 13 contingut de sulfats

1.9 Estudi de solucions

La solució òptima per al disseny dels fonaments s'obté a partir de diferents criteris com econòmics, funcionals, tècnics, legals... Principalment s'ha tingut en compte la caracterització geotècnica del terreny ja que es la base de tot el posterior càlcul. D'aquest mode, s'ha de realitzar un estudi detallat de tota la informació de partida que es disposa per a poder caracteritzar el terreny de la manera més pròxima als paràmetres que es troben a la localització del parc eòlic.

Després de la realització de diferents models de terrenys i cimentacions, la solució obtinguda es la realització de fonaments superficials degut a les característiques òptimes i terreny competent i homogeneïtzar els 5 models de terreny en un únic. En el pla 03_04 del Document nº2 es detalla de forma precisa aquesta secció.

Font: Elaboració pròpia

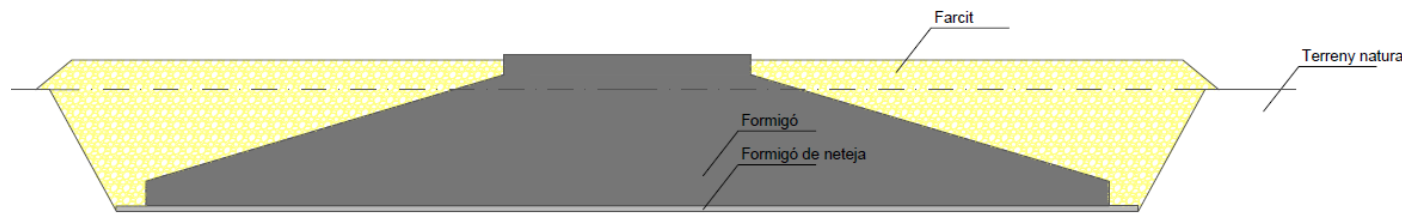


Figura 3: Esquema secció pròpia proposada

1.10 Desenvolupament de la solució adoptada

La solució elegida respecte el model geotècnic es la unificació de les 5 litologies de cada aerogenerador en una sola. D'aquesta manera, només s'haurà de realitzar el càlcul estructural en un model litològic únic. L'elecció ha estat basada en l'anàlisi dels diferents assajos on s'observa un terreny molt semblat degut a la proximitat entre els aerogeneradors. D'aquesta manera, ja que estan situats a la mateixa zona, les característiques litològiques i els seus paràmetres es poden unificar en un sol terreny. Per tant, es prescindeix dels 5 perfils litològics fent únicament ús d'un unificat.

Per altra banda, la cimentació de la sabata es superficial ja que el terreny és competent. Concretament, es tracta de roca meteoritzada en diferents graus.

1.11 Geometria de la secció i perfil litològic

El perfil litològic i la geometria adoptada es troben definits de forma més àmplia a l'Annex 01_2 i Annex 02_02 respectivament.

El perfil litològic que s'empra consta de 6 formacions descrites a continuació (des de la part superficial a la més subterrània).

- 0,5 m de terra vegetal
- 0,5 m d'argila llimosa
- 3 m de substrat rocós alterat grau IV-III
- 2,5 m de substrat rocós alterat grau II
- 6 m de substrat rocós IB
- 13 m de substrat rocós sa

Respecte a la geometria de la secció està constituïda per una base de 19,5 metres de diàmetre sobre la que recolza un pedestal de 5 m de diàmetre.

1.12 Pressupost

1.12.1 Definició de les unitats d'obra

Les diferents unitats relacionades en l'execució de les 5 cimentacions dels aerogeneradors es disposen al Document nº3.

1.12.2 Mesuraments

Els diferents mesurament relacionats amb aquest Treball de Fi de Màster es troben localitzats al Document nº3.

1.12.3 Quadres de preus

Els quadres de preus relacionats amb l'execució del present estudi es troben reunides al Document nº3.

1.12.4 Pressupost

Font: Elaboració pròpia

	IMPORT	Ud.	%
Formigó en massa en la sabata	27.974,46	€	65,99
Formigó de neteja	1.796,70	€	4,24
Farcit	5.382,47	€	12,70
Excavació terreny natural	4.855,58	€	11,45

	IMPORT	Ud.	%
Transport terreny. Distància màxima 5 km	2.384,52	€	5,62
PRESSUPOST D'EXECUCIÓ MATERIAL	42.393,72	€	
PRESSUPOST 5 FONAMENTS (P5F)	211.968,62	€	
13% Despeses generals (s/P5F)	27.555,92	€	
6% Benefici indústria (s/P5F)	12.718,12	€	
PRESSUPOST BASE DE LICITACIÓ SENSE IVA	252.242,65	€	
I.V.A: 21% (s/P5F+GG+BI)	52.970,96	€	
PRESSUPOST BASE DE LICITACIÓ	305.213,61	€	

Figura 4: Pressupost de les 5 cimentacions dels aerogeneradors

Una vegada aplicats els preus als mesuraments de les distintes unitats d'obra, es obtingut un pressupost d'execució material d'una quantitat de DOS CENTS ONCE MIL NOU CENTS SEIXANT HUIT EUROS AMB SEIXANTA DOS CÈNTIMS (211.968,62 €).

Aplicant a la xifra anteriorment citada els percentatges del 13% referit a les despeses generals, 6% del benefici industrial i 21 % d'IVA es obtingut el pressupost de base de licitació. Per tant, ascendeix el pressupost a la quantitat de TRES CENTS CINC MIL DOS CENTS TRETZE EUROS AMB SEIXANT UN CÈNTIMS (305.213,61 €).

El preu final de l'obra es deurà comparar amb altres tipologies proposades per altres companyies. Es destaca que realitzar la cimentació superficial escollida garanteix els mètodes de fallada citats a l'Eurocodi 7 i reduirà la possibilitats de problemes estructurals.

1.13 Beneficis de la solució adoptada des del punt vista del disseny i econòmic

La solució que finalment s'ha adoptat té diversos beneficis des del punt de vista del disseny i per conseqüència també des de la part econòmica.

Realitzar un disseny basant-se en la unificació de les 5 ubicacions en un única redueix el temps necessari per a la realització del document i per tant, una disminució també des del punt de vista econòmic. Per altra part, la realització d'un fonament superficial és més econòmic ja que en primer lloc l'excavació serà de menor volum i per tant el temps necessari es reduirà si es compara amb altres mètodes com la execució de pilons.

Capítol 2.

Anàlisi crític de l'estudi geològic i geotècnic

2 Anàlisi crític de l'estudi geològic i geotècnic

La informació referida a la geologia i geotècnica del parc eòlic es troba descrita a l'Annex 01_02 del present Treball de Fi de Màster.

Cal destacar que per al tractament de dades, tant aquelles obtingudes al camp com al laboratori, s'ha emprat diversos mètodes estadístics per a que les dades foren tractades tenint en compte un ordre de magnitud i poder eliminar aquelles dades atípiques. A més a més, s'ha realitzat el següent procediment per al tractament de cada assaig.

En primer lloc s'han ordenat les dades de forma coherent en una tabla. Una vegada realitzada la tabla, s'han distribuït els paràmetres en funció del sondeig i de la formació que pertanyen. Seguidament, s'ha observat que les dades foren del mateix ordre de magnitud mitjançant anàlisis estadístics i/o criteri propi. Finalment, s'ha designat un únic valor per a cada formació.

2.1 Geologia

Els materials pertanyen al períodes de l'Oligocè i Miocè. Per altra banda, s'indica també la presència d'algeps amb argiles i calcàries associades amb algeps.

2.1 Expansivitat i karstificació

Segons el mapa del I.G.M.E (Institut geològic i miner d'Espanya) la zona estudiada no té risc d'expansivitat. Tanmateix, respecte la karstificació, segons l'I.G.M.E no hi ha perill però existeixen projecte de la zona de la Comunitat Foral de Navarra on es presenta aquest fenomen.

2.1 Sismicitat

La norma Sismorressitent no es d'aplicació en el present cas, ja que la ubicació del parc es troba localitzada en una posició on l'acceleració bàsica es inferior a 0.04g.

2.1 Investigació en camp

Les prospeccions que s'han realitzat al camp són les següents:

- Sondejos: a partir d'ells s'han obtingut mostres del terreny i s'ha pogut designar un perfil litològic d'aquest. A més a més, informa sobre el nivell freàtic de la ubicació.
- Sondatges mecànics de reconeixements: s'ha recollit mostres per a analitzar-les al laboratori.
- SPT: verificar les hipòtesis de roca obtingudes als sondejos
- PLT (resistència a càrrega puntual): s'ha pogut aconseguir la compressió simple de forma indirecta mitjançant una sèrie de correlacions.
- Sísmica passiva: mitjançant unes series de correlacions s'ha obtingut el mòdul dinàmic necessari per al càlcul de la rigidesa rotacional dinàmica característica de les estructures en moviment.

2.2 Investigació al laboratori

A partir de les mostres realitzades al camp, s'han pogut realitzar una sèrie d'assajos al laboratori:

- Resistència a compressió uniaxial: a diferència del PLT, es tracta d'un assaig directe per a l'obtenció de la compressió simple. A més a més, també es pot determinar la densitat del terreny.
- Determinació de la densitat
- Contingut de sulfats: tenint en compte els límits establerts per la EHE, es pot considerar l'agressivitat del terreny.

Capítol 3.

Determinació de les càrregues

3 Determinació de les càrregues

Les càrregues que s'han tingut en compte per al disseny de les 5 cimentacions del parc eòlic s'han obtingut a partir de les accions de partida a la base de la torre de l'aerogenerador. A més a més, s'ha calculat la càrrega que produeix el formigó de la sabata i el farcit corresponents aquestes a la càrrega morta. No es necessari considerar la càrrega sísmica en el disseny de les cimentacions degut al baix risc d'aquesta.

Per al càlcul de les càrregues s'ha seguit la llei d'estabilitat per a poder calcular les càrregues en la base de la cimentació a partir de les accions en la base de la torre de l'aerogenerador. Cal remarcar que la força H estarà modificada pel moment torsor que genera l'aerogenerador. Per tant, l'expressió per a calcular aquesta força H', és a dir, la força H equivalent o Hd, s'exposa a continuació.

Font: Guidelines for design of wind turbines

$$H' = \frac{2 \cdot M_z}{l_{eff}} + \sqrt{H^2 + \left(\frac{2 \cdot M_z}{l_{eff}}\right)^2}$$

(1)

On:

- H': força H equivalent (kN)
- Mz: moment torsor aplicat al fonament (kN.m)
- leff: longitud efectiva del fonaments, calculada a l'apartat "Àrea efectiva dels fonaments" (m)
- H: força horitzontal aplicada al fonament (kN)

Figura 5: Acció vertical modificada pel moment torsor

D'aquesta manera, les càrregues ponderades segons el factor parcial que es tindran en compte són:

- Moment de càlcul (paràmetre de partida)
- Esforç vertical (paràmetre de partida)
- Força H equivalent
- Esforç creat pel pes propi del formigó de la sabata
- Esforç creat per pes que genera el farcit

Cal garantir la vida útil del farcit ja que aquest es considerat al càlcul estructural dels 5 fonaments.

Per altra part, cal afegir la utilització dels factors parcial indicats a l'Eurocodi 7 aplicats segons el "Design Approach 2" per a realitzar les 6 combinacions pertinents que ens indiquen a la informació inicial. Aquest criteri s'aplica a l'estat límit últim i consisteix en aplicar factors parcial a les accions i a les resistències mentre que els paràmetres que depenen de sol queden sense aplicar cap factor. Per tant, com podem observar a la següent taula, els factors utilitzats son A1, M1 i R2.

Els factors parcial utilitzat en l'estat límit de servei és 1.

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

Design Approach 2			↓	↓	↓
Partial Factor Set			A1	M1	R2
Permanent Actions (G)	Unfavourable	γ_G			1.35
	Favourable	$\gamma_{G,fav}$			1.0
Variable Actions (Q)	Unfavourable	γ_Q			1.5
	Favourable	$\gamma_{Q,fav}$			0.0
Coefficient of shearing resistance ($\tan \phi$)		γ_ϕ			1.0
Effective cohesion (c')		$\gamma_{c'}$			1.0
Undrained shear strength (c_u)		γ_{c_u}			1.0
Bulk unit weight (γ)		γ_γ			1.0
Shallow Foundation	Bearing resistance (R_v)	γ_{R_v}			1.4
	Sliding resistance (R_h)	γ_{R_h}			1.1

Figura 6: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim

Aquest factor es combinen en les accions de cada u dels 6 casos següents:

- Cas 1: S3 (prob. 10-2) - DLC 1.1 (SLS)
- Cas 2: S1 (charac. extreme) - DLC 1.5 (SLS)
- Cas 3: Extreme Normal 1 - DLC 1.5 (ULS)
- Cas 4: Extreme Normal 2 - DLC 1.5 (ULS)
- Cas 5: Abnormal 3 - DLC 2.2 (ALS)
- Cas 6: Abnormal 4 - DLC 2.2 (ALS)

Capítol 4.

Verificació mètodes fallada

4 Verificació mètodes de fallada

Els factors i coeficient utilitzats per a verificar els mètodes de fallada són els proposats per l'Eurocodi 7 segons el criteri de disseny de l'Approach 2.

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

Design Approach 2			↓	↓	↓
Partial Factor Set			A1	M1	R2
Permanent Actions (G)	Unfavourable	γ_G	1.35		
	Favourable	$\gamma_{G,fav}$	1.0		
Variable Actions (Q)	Unfavourable	γ_Q	1.5		
	Favourable	$\gamma_{Q,fav}$	0.0		
Coefficient of shearing resistance ($\tan \phi$)		γ_ϕ		1.0	
Effective cohesion (c')		$\gamma_{c'}$		1.0	
Undrained shear strength (c_u)		γ_{c_u}		1.0	
Bulk unit weight (γ)		γ_γ		1.0	
Shallow Foundation	Bearing resistance (R_v)	γ_{Rv}			1.4
	Sliding resistance (R_h)	γ_{Rh}			1.1

Figura 7: Factors parcial

4.1 Lliscament

Aquest mètode de fallada es verifica entre el propi fonament (la sabata) i el terreny natural. Cal verificar que les accions horitzontals són menors que la resistència horitzontal de disseny.

Font: Eurocodi 7

$$H_d \leq H_{failure\,d} = \frac{A_{eff} \cdot \frac{c'}{\gamma_c} + V_d \cdot \tan \left(k \cdot a \tan \left(\frac{\tan \phi_k'}{\gamma_\phi} \right) \right) + E_{passive}}{\gamma_{Rh}}$$

(2)

On:

- A_{eff} = àrea efectiva (m^2)
- c' : cohesió al nivell de la cimentació (kPa)
- γ_c : factor de seguretat per a minorar la cohesió. Obtingut a l'Eurocodi 7. (adimensional)
- V_d : acció vertical a la base de la cimentació (adimensional)

- γ_{Rh} : factor de residència front a lliscament (adimensional)
- $E_{passiva}$: contribució passiva de la terra i cohesió. No es considerada (kPa)
- k : coeficient de fricció. Es considera un valor de 1 segons l'Eurocodi 7. (adimensional)
- γ_o : factor de seguretat per a minorar la resistència a tallament. Obtingut a l'Eurocodi 7. (adimensional)

Figura 8: Formulació per a verificar el lliscament

El coeficient de seguretat segon l'Eurocodi es 1.1.

4.2 Capacitat de suport

Aquest mètode, descrit tant a l'Eurocodi 7 com a la Guia de disseny de "Guideles for Wind Turbines" anomena que la càrrega d'enfonsament es calcula mitjançant la formulació analítica de Brinch-Hansen, Aquesta formulació es basa en l'aportació de 3 termes principals: la sobrecàrrega existent al nivell de fonaments (q_0), la cohesió del terreny (c) i el pes propi (p).

Font: Eurocodi 7

$$R/A_{eff} = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot t_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot t_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot B_{eff} \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot d_\gamma \cdot t_\gamma$$

(3)

On:

- $R/A_{eff}=q_d$: capacitat de suport de disseny (kPa)
- γ' : densitat (kN/m^3)
- b_{eff} : ample efectiu del fonaments, calculada a l'apartat "Àrea efectiva dels fonaments" (m)
- N_γ : factor de capacitat de suport dependent de la densitat (adimensional)
- S_γ : factor de forma dependent de la densitat (adimensional)
- i_γ : factor de inclinació dependent de la densitat (adimensional)
- d_γ : factor de profunditat dependent de la densitat (adimensional)
- f_γ : factor d'àrea inclinada dependent de la densitat (adimensional)
- q : pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (kPa)
- N_q : factor de capacitat de suport dependent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- s_q : factor de forma dependent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- i_q : factor de inclinació dependent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)

- dY: factor de profunditat dependent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- fY: factor d'àrea inclinada dependent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- cc: cohesió (kPa)
- Nc: factor de capacitat de suport dependent de la cohesió (adimensional)
- Sc: factor de forma dependent de la cohesió (adimensional)
- ic: factor de inclinació dependent de la cohesió (adimensional)
- dc : factor de profunditat dependent de la cohesió (adimensional)
- fc : factor d'àrea inclinada dependent de la cohesió (adimensional)

Figura 9: Capacitat de suport

El coeficient de seguretat segon l'Eurocodi es 1.4.

4.3 Rigidesa rotacional dinàmica

Aquesta verificació es realitza en estructures que produeixen moviment, com ara els aerogeneradors a partir de les seues aspes. Segons el document "Guidelines for Design of Wind Turbines", la rigidesa rotacional dinàmica relaciona el moment amb l'angle de gir. La seua obtenció, com s'observa a la següent expressió, depèn del radi (R) de la base de la cimentació i del mòdul de tallament dinàmic, Gdinàmic.

Font: Guidelines for design of wind turbines

$$K_{R,DYN} = \frac{8 \cdot G_{DYN} \cdot R^3}{3 \cdot (1-\nu)} \cdot \beta_1$$

(4)

On:

- KDYN: mòdul de tallament dinàmic (MNm/rad)
- R: radi del fonament (m)
- v: coeficient de Poisson (adimensional)
- B1 : factor de reducció per el "levantament" de la sabata (adimensional)

Figura 10: Mòdul de rigidesa rotacional dinàmica

El valor mínim d'aquest valor, segons les bases de partida és de 270.000 MN.m/rad.

4.4 Seients

- Per a l'obtenció dels seients, s'utilitza la formulació de Jimenez Salas detallada a continuació. Aquesta expressió, com detalla el seu autor, permet l'obtenció del gir en una cimentació circular en un mitjà elàstic, isòtrop i infinit.

Font: Guia de cimentacions d'obres de carretera

$$\theta = \frac{3}{4} \cdot \frac{1-\nu^2}{E \cdot R^3} \cdot M_{SLS}$$

(5)

On:

- θ : gir del fonament (rad)
- R: radi del fonament (m)
- v: coeficient de Poisson (adimensional)
- E : mòdul de deformació (MPa)
- Msls : momento en un estat límit de servici (KN.m)

Figura 11: Mòdul de tallament dinàmic

Habitualment, els requisits respecte als seients diferencials en cimentacions és el següent:

- Una inclinació màxima de 3 mm/m al llarg de tota la vida útil

Capítol 5.

Conclusions

5 Conclusions

El disseny geotècnic de fonaments no és un procés fàcil de realitzar. El principal motiu es la necessitat de caracteritzar el terreny on recolzaran aquests de la manera més precisa possible ja que tot els càlculs posteriors es basaran en eixos paràmetres. Per tant, cal emprar una sèrie de coneixements a l'hora d'analitzar un estudi geològic i geotècnic.

En primer lloc, per a poder realitzar un estudi detallat i el més representatiu possible, cal conèixer tots els assajos que es disposen i tindre la capacitat crítica de decidir si les dades proporcionades per aquests s'ajusten a la realitat o l'ordre de magnitud està molt per damunt o per davall del material. Lògicament, per a saber tractar aquests aspectes de manera ràpida cal tindre una àmplia experiència en el camp de la geologia i geotècnic. També és necessari coneixements sobre mètodes estadístics per a poder valorar els paràmetres geotècnics.

La caracterització geotècnica s'ha realitzat mitjançant una campanya real on s'han tingut que emprar tots els coneixements apresos tant durant el Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Port com durant el Grau en Enginyeria Civil per a poder tractar i comprendre cada assaig. Tanmateix hi ha una sèrie d'aspectes a la campanya analitzada que es podrien millorar.

Cal remarcar que s'ha emprat la cimentació superficial degut al terreny competent que és la roca i per tant no és de necessitat la realització d'una cimentació profunda per a aconseguir un terreny competent on recolzar la sabata.

El document inicial no té en compte la presència de cavitats formades a partir del procés de la karstificació ja que quan es recuperen les mostres dels sondejos pràcticament el percentatge de material obtingut es quasi del 100%. Tanmateix, existeixen projectes a la Comunitat Foral de Navarra on s'indica la presència d'aquest fet degut a la presència de roques evaporítiques. Per tant, seria convenient realitzar una investigació addicional per a verificar la hipòtesis de no karstificació a la localització del futur parc eòlic.

Per altra banda, com s'ha explicat a l'Annex 0_02, no queda clar l'aspecte de l'existència del nivell freàtic. Per tant, es deuria realitzar un control periòdic per a verificar si es tracta d'aigua deguda al nivell freàtic o sols es aigua procedent de la execució del sondejos.

Des del punt de vista estructural, cal garantir la vida útil del farcit ja que aquest ha sigut considerat al disseny dels fonaments.

A més a més, s'han realitzat les verificacions dels mètodes de fallada pertinents destacant la rigidesa rotacional dinàmica ja que es tracten d'estructures en moviments degut al moviment de les aspes. Cal remarcar que al disposar d'un terreny competent, complirà aquesta verificació.

Finalment, s'ha realitzat una valoració econòmica la qual podrà ser comparada amb altres dissenys per als fonaments dels 5 aerogeneradors del parc eòlic de la Comunitat Foral de Navarra (Espanya).

València, setembre 2020



Patricia Benavent Benavent

Capítol 6.

Referències

6 Referències

- ANDRÉS, C. (2012). *Ondas sísmicas y sensores inalámbricos: herramientas potenciales para la prospección de subsuelos a baja profundidad*.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1975). *The point load test in geotechnical practice*.
- BOWLES, J. (1996). *Foundation analysis and design*.
- BRAN SÁNCHEZ, J. (2009). *Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el Salvador*.
- CHALIKAKIS, K. & PLAGNES, V. (2011). *Contribution of geophysical methods to karst – system exploration: An overview*.
- COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN. (2004). *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1. Reglas generales (UNE-EN 1997-1)*. Madrid.
- COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN. (2007). *Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 2. Proyecto asistido por ensayos de laboratorio (UNE-ENV 1997-2)*. Madrid.
- DAS, B.M. (1985). *Evaluation of the point load strength for soft rock*. Morgantown
- D.N.V, RISO. (2002). *Guidelines for design of wind turbines*. Copenhagen.
- DEVINCENZI, MARCELO. (2004). *Ensayos geotécnicos in situ. Su ejecución e interpretación*. Girona.
- ECHEVERRI, N. (2008). *Obtención de la rigidez dinámica del suelo a partir de la medición de la energía transferida en el ensayo de penetración estándar (SPT)*. Bogotá.
- GALÁN, C. (2018). *Hallazgo de una interesante cavidad en la formación yesos de Falces*. Navarra.
- GALÁN, C. (2019). *Cavidades en yeso laminado con margas en la base de un acantilado en los márgenes del río Ega*. Navarra
- GALÁN, C. (2019). *Descubrimiento de espeleotemas, snowballs y frostworks de yeso, anhidrita, basanita y thenardita en cavidades de Sierra Perra*. Navarra
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I, FERRER., M., ORTUÑO, L., & OTEO, C. (2003). *Ingeniería geológica*. Madrid.
- HILL, C. (1997). *Cave mineral of the world*.
- HOEK, E. (1977). *Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organization*.
- INTERNATIONAL CODE COUNCIL (2018). *International building code*. Estados Unidos.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING. Lisboa.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A., & CARRIÓN CARMONA, M. Á. (2002). *Problemas de geotecnia y cimentos*. Valencia: Editorial UPV.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A., CARRIÓN CARMONA, M. Á., & UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO. (2000). *Geotecnia y cimentos I: Complementos teóricos. problemas propuestos y resueltos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A. (2001). *Cuestiones de geotecnia y cimentos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- KIM, K. (1987). *Suggested methods for rock stress determination*.
- LEPAROUX, D. & GRANDJEAN, G. (2004). *The potential of seismic methods for detecting cavities and buried objects: experimentation at a test site*.
- LEPAROUX, D. & BITRI A. (2000). *Underground cavity detections: a new method base don seismic Rayleigh waves*.
- LÓPEZ, C. (2000). *Manual de sondeos*. Madrid
- MARCHETTI, SILVANO. MARCHETTI, DIEGO & VILLALOBOS, FELIPE. (2013). *El dilatómetro sísmicos SDMT para ensayos de suelo insitu*. Italia
- MAZARIEGOS, A. (1993). *Reconocimientos del terreno*. Madrid
- MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN OMENTO. *Instituto geológico y minero de España*. Madrid.
- MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA. (2008). *Instrucción de hormigón estructural*. Madrid.
- MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA. (2009). *Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)*. Madrid.
- MOPU. (1975). *Estudios geotécnicos*. Madrid.
- NISTAL, J. (2015). *Modelado y control dinámico de un aerogenerador*. Cantabria.
- OTEO. (1978). *Ensayos de laboratorio en la mecánica de rocas*. Madrid.
- PECK, HANSON AND THORNBUR. (1974). *Foundation engineering*
- RUSNAK, J. (2009). *Using the point load test to determine the uniaxial compressive strength of coal measure rock*. Pittsburh.
- SALVANY, J (1997). *Las formaciones evaporíticas del terciario continental de la cuenca del Ebro en Navarra y La Rioja*. Barcelona.

- SOCIEDAD DE CIENCIAS ARANZADI (2019). *Sismas en yesos y fracturas de borde en los acantilados de Falces*. Navarra.
- SMITH, H.J. (1997). *The point load test for weak rock in dredging applications*
- SNEL, H. (2005). *Energía eólica: cargas dinámicas sobre la turbina y dinámica de la estructura*.
- SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA (2018). 52 Jornada Sesión sobre obras de interés geotécnico. Madrid.
- SUÁREZ DIAZ, J. (2015). *Visión geotécnica de la amenaza sísmica*.
- TERZAGHI, K. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*
- ZHANG, J. (2005). *Normalized shear modulus and material damping ratio*
- ZHOU, W.. (1999). *Investigation of ground water Flow in karst áreas using component separation natural potential measuraments*.