



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)

---

## **Annex 01\_02 Anàlisi crític de la informació geològica i geotècnica**

Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

*Curs: 2019/2020*

*Autora: Benavent Benavent, Patricia*

*Tutor: Martínez Ibáñez, Víctor*

## Índex de figures

Figura 1: Pla situació del futur parc eòlic .....	7	Figura 30: Mòdul de deformació de cada estrat .....	25
Figura 2: Emplaçament del futur parc eòlic .....	7	Figura 31: Recopilació dades de l'assaig de resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca .....	26
Figura 3: Mapa geològic de la fulla de Lodosa (fulla 205) .....	8	Figura 32: Anàlisi de les dades de l'assaig de resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca en funció de la formació i sondeig .....	27
Figura 4: Mapa geològic de la localització dels aerogeneradors .....	8	Figura 33: Representació de la compressió simple de la formació i tant de l'assaig uniaxial com del PLT mitjançant el diagrama box-whiskers .....	27
Figura 5: Risc geològic al parc eòlic .....	9	Figura 34: Gràfic box-whiskers de la resistència a la compressió simple .....	28
Figura 6: Risc d'expasivitat d'argiles a Espanya .....	10	Figura 35: Resistència a la compressió simple en funció de la formació .....	28
Figura 7: Risc d'expasivitat d'argiles a la Comunitat Foral de Navarra .....	10	Figura 36: Recopilació dades assaig determinació de la densitat .....	29
Figura 8: Mapa de karstificació a Espanya .....	11	Figura 37: Recopilació dades assaig resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca .....	29
Figura 9: Karstificació a la Comunitat Foral de Navarra .....	11	Figura 38: Anàlisi dades assaig determinació de la densitat en funció de la formació i sondeig .....	29
Figura 10: Perfil litològic de les ubicacions dels aerogeneradors .....	13	Figura 39: Anàlisi dades assaig resistència a compressió uniaxial en funció de la formació i sondeig .....	30
Figura 11: Criteris de reconeixement de roques .....	14	Figura 40: Densitat aparent en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	30
Figura 12: Perfil litològic de les ubicacions dels aerogeneradors .....	15	Figura 41: Recopilació dades assaig contingut de sulfats solubles .....	31
Figura 13: Perfil litològic proposat .....	16	Figura 42: Anàlisi dades assaig contingut de sulfats solubles en funció de la formació i sondeig .....	31
Figura 14: Mesures nivell freàtic .....	17	Figura 43: Classificació de l'agressivitat química .....	31
Figura 15: Mesures nivell freàtic 4 de març del 2020 per al disseny de les cimentacions .....	17	Figura 44: Contingut de sulfats en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	31
Figura 16: Profunditat i valors dels assajos SPT .....	18	Figura 45: Resistència a la compressió simple en funció de la formació .....	32
Figura 17: Sondeig 3 .....	19	Figura 46: Paràmetres per a la classificació geomànica RMR .....	32
Figura 18: Compressió simple a partir de l'assaig PLT .....	19	Figura 47: RMR. Sondeig 1 .....	33
Figura 19: Recopilació dades assaig de resistència a la càrrega puntual .....	20	Figura 48: RMR. Sondeig 2 .....	34
Figura 20: Anàlisi dades assaig de resistència a la càrrega puntual en funció de la formació i sondeig .....	20	Figura 49: RMR. Sondeig 3 .....	35
Figura 21: Relació del mòdul Go amb la velocitat s de les ones .....	21	Figura 50: RMR. Sondeig 5 .....	36
Figura 22: Fonts de càrrega dinàmica i esforç de tallant associat .....	21	Figura 51: RMR. Sondeig 6 .....	37
Figura 23: G/Go en funció del esforç de tallant .....	21	Figura 52: RMR per a cada formació .....	38
Figura 24: Velocitats ones s .....	22	Figura 53: Angle de fregament en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	38
Figura 25: Recopilació dades assaig sísmica passiva .....	23	Figura 54: Cohesió en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	38
Figura 26: Classificació del terreny en funció de la velocitat s .....	24	Figura 55: Resum. Paràmetre densitat aparent .....	39
Figura 27: Anàlisi dades assaig de sísmica passiva en funció de la formació i sondeig .....	24	Figura 56: Resum. Resistència a la compressió simple .....	39
Figura 28: Representació gràfica del diagrama de Box-Whiskers de cada formació .....	25	Figura 57: Resum. Paràmetre angle de fregament .....	39
Figura 29: Gdin (assaig sísmica passiva) en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	25	Figura 58: Resum. Paràmetre cohesió .....	39

**Figura 59: Mòdul de deformació de cada estrat ..... 39**  
**Figura 60: Resum. Paràmetre mòdul dinàmic ..... 39**

## ÍNDIX

<b>ÍNDIX DE FIGURES</b> .....	<b>2</b>
<b>1 INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>5</b>
<b>2 OBJECTE</b> .....	<b>6</b>
<b>3 EMPLAÇAMENT DEL PARC EÒLIC</b> .....	<b>7</b>
<b>4 REQUADRE GEOLÒGIC</b> .....	<b>8</b>
<b>5 HIDROLOGIA I GEOTÈCNIA</b> .....	<b>9</b>
5.1 HIDROLOGIA .....	9
5.2 RISCS GEOLÒGICS. GEOTÈCNIA .....	9
<b>6 EXPANSIVITAT</b> .....	<b>10</b>
<b>7 KARSTIFICACIÓ</b> .....	<b>11</b>
<b>8 SISMICITAT</b> .....	<b>13</b>
<b>9 INVESTIGACIÓ EN CAMP / IN SITU</b> .....	<b>14</b>
9.1 SONDEJOS .....	14
9.2 SONDATGES MECÀNICS DE RECONeixEMENT .....	17
9.3 SPT.....	17
9.4 PLT: ASSAIG DE RESISTÈNCIA A LA CÀRREGA PUNTUAL.....	19
9.5 SÍSMICA PASSIVA (MÒDUL DINÀMIC) .....	20
9.6 ASSAJOS DILATOMÈTRICS (MÒDUL DE DEFORMACIÓ).....	25
<b>10 INVESTIGACIÓ AL LABORATORI</b> .....	<b>26</b>
10.1 RESISTÈNCIA A COMPRESSIÓ UNIAxIAL DE PROvETES CILÍNDRIQUES DE ROCA .....	26
10.2 DENSITAT APARENT. DETERMINACIÓ DE LA DENSITAT I ASSAIG DE COMPRESSIÓ SIMPLE .....	28
10.3 CONTINGUT DE SULFATS .....	30
<b>11 PARÀMETRES OBTINGUTS MITJANÇANT CORRELACIONS AMB ASSAJOS: ANGLE DE FREGAMENT I COHESIÓ</b> <b>32</b>	
<b>12 PARÀMETRES PER AL DISSENY DE LES CIMENTACIONS</b> .....	<b>39</b>
<b>13 CONCLUSIONS</b> .....	<b>40</b>
<b>14 REFERÈNCIES</b> .....	<b>41</b>



## **1 Introducció**

Aquest document analitza i descriu les característiques geotècniques d'un parc eòlic localitzat a la Comunitat Foral de Navarra. El parc està constituït per 5 aerogeneradors i el principal objectiu és el disseny de les seues cimentacions. Prèviament, per al correcte càlcul de les estructures es definirà en aquest Annex el procediment selectiu que s'ha seguit per adquirir els paràmetres del terreny on recolzaran els aerogeneradors. Cal remarcar que la principal base d'un òptim disseny és la correcta caracterització mitjançant l'ús de paràmetres representatius del terreny.

Per tant, en el present document, es tractarà de realitzar una caracterització del terreny identificant els materials que el conformen. A més a més, s'obtindrà la profunditat de cada material que forma cada estrat i la seua profunditat en cada una de les 5 ubicacions dels aerogeneradors.

A més a més, al realitzar aquest document sobre una estructura dinàmica, ja que es tracten d'aerogeneradors, es donarà un importància rellevant al mòdul dinàmic, i per tant, a l'assaig de sísmica passiva que s'estudiarà a l'Annex 02\_02.

## **2 Objecte**

El present document té com a objectiu principal l'anàlisi dels diferents assajos procedents d'una campanya geotècnica real per a poder realitzar la caracterització del terreny al llarg del parc eòlic. Aquests assajos s'han realitzat tant en camp com al laboratori. A més a més, s'han estudiat tècniques geofísiques com altra documentació de suport a partir d'un anàlisi crític.

D'aquesta manera, a partir de la documentació de partida disposada a través de la pròpia empresa, s'han establert una sèrie de relacions, paràmetres i condicions generals per a poder descriure el terreny on recolzarà la cimentació, els diferents materials, l'obtenció de les profunditats de cada estrat i la seua ubicació.

Adicionalment, es proposen una sèrie de millores rellevant de la campanya geotècnica de partida.

### 3 Emplaçament del parc eòlic

Aquest parc eòlic es troba localitzat a la Comunitat Foral de Navarra, concretament en la Merintat d'Estella, a 50 km de Pamplona, capital de la província.

El parc eòlic s'ubica a 3,5 km de la població de Lodosa i a 6 km de Sesma. Aquest estarà format per 5 aerogeneradors amb turbines d'una potència de 2000 kW cadascuna. Al següent mapa s'assenyala la ubicació general del parc eòlic.

Font: Google Maps

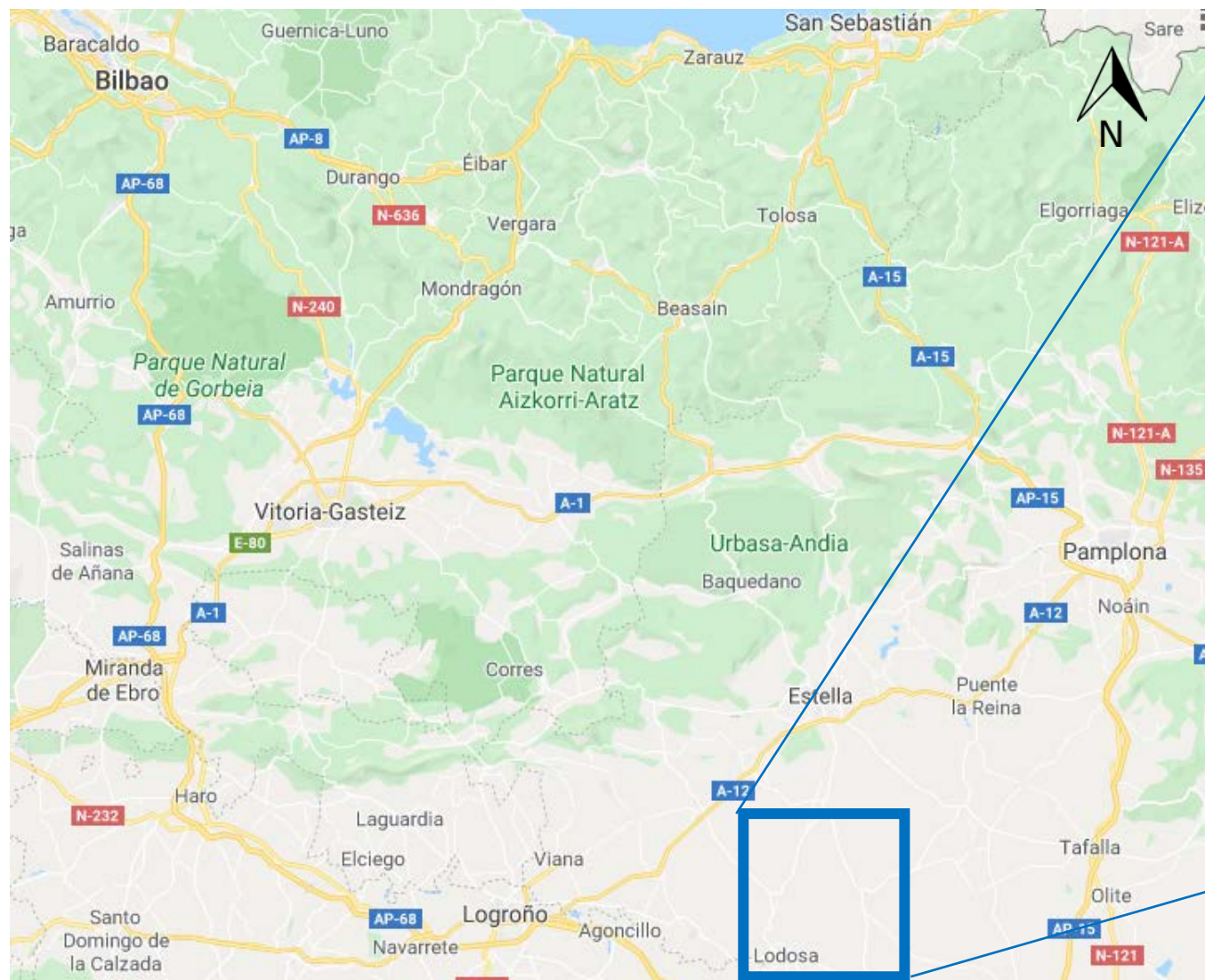


Figura 1: Pla situació del futur parc eòlic

Font: Google Maps



Figura 2: Emplaçament del futur parc eòlic

A continuació, s'observa una ampliació de la zona estudiada on es localitzarà el parc eòlic.



## 4 Requadre geològic

La zona on s'ubicaran els 5 aerogeneradors pertany a la fulla 5 del Mapa Geològic d'Espanya publicat per l'institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E). Concretament, pertany a la fulla 205, anomenada Lodosa. A més a més, es localitza al marge esquerre del riu Ebre i té com a la límit la comunitat de la Rioja.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)

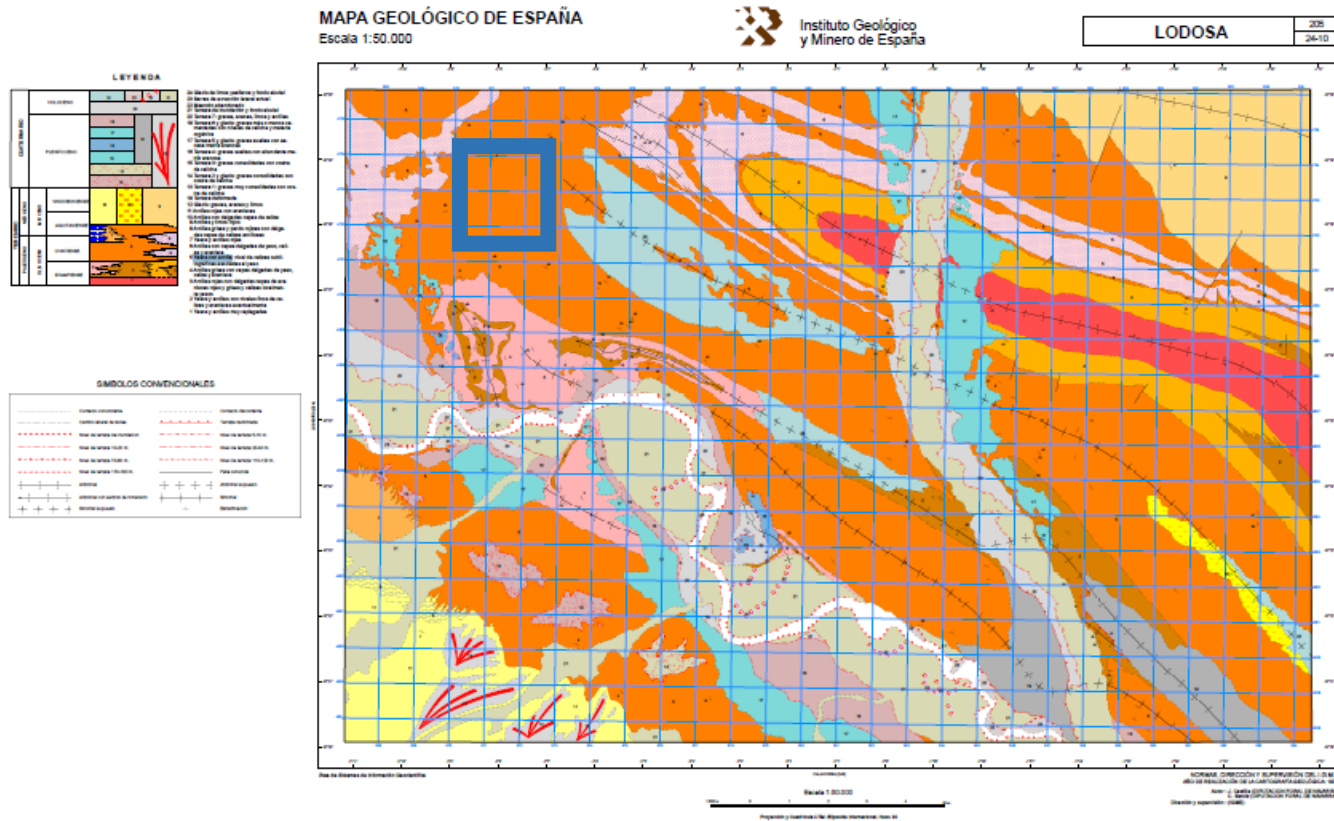
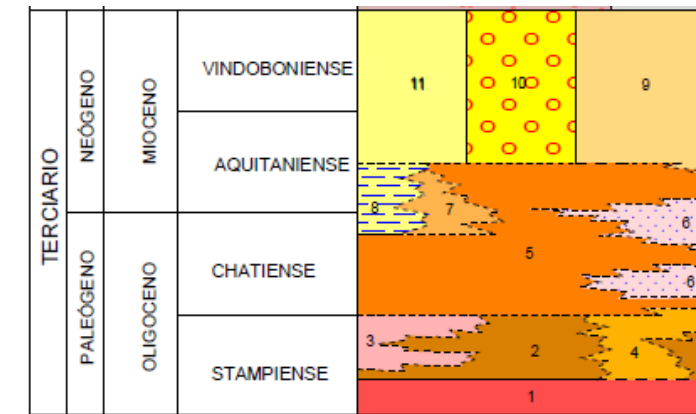
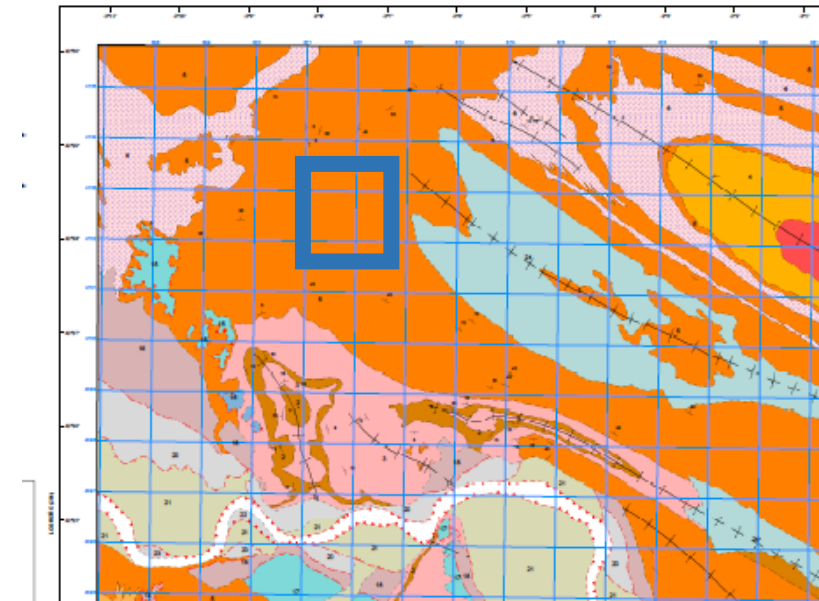


Figura 3: Mapa geològic de la fulla de Lodosa (fulla 205)

Com podem observar a la llegenda, els materials pertanyen als períodes de l'Oligocè i Miocè. Per altra banda, s'indica també la presència d'algeps amb argiles i calcàries associades amb algeps.

A continuació, es pot observar un requadre més reduït de la zona on es localitzaran els aerogeneradors i la llegenda.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)



- 13 terraza 1. gravas muy consolidadas con costra de caliche
- 19 Terraza deformada
- 12 Glacis: gravas, arenas y limos
- 11 Arcillas rojas con areniscas
- 10 Arcillas con delgadas capas de caliza
- 9 Arcillas y limos rojos
- 8 Arcillas grises y pardo rojizas con delgadas capas de calizas arcillosas
- 7 Yesos y arcillas rojas
- 6 Arcillas con capas delgadas de yeso, caliza y arenisca
- 5 Yesos con arcilla; nivel de calizas sublitográficas asociadas al yeso
- 4 Arcillas grises con capas delgadas de yeso, caliza y arenisca
- 3 Arcillas rojas con delgadas capas de areniscas rojas y grises y calizas localmente yesos
- 2 Yesos y arcillas con niveles finos de calizas y areniscas eventualmente
- 1 Yesos y arcillas muy replegadas

Figura 4: Mapa geològic de la localització dels aerogeneradors

## 5 Hidrologia i geotècnic

### 5.1 Hidrologia

La hidrologia depèn directament del requadre geològic de la zona d'estudi on s'ubicaran els 5 aerogeneradors del parc eòlic.

La principal característica litològica d'aquesta ubicació és massís rocós d'algeps, d'aquesta manera els materials seran entre semipermeables i impermeables en funció del nivell de fracturació. Aquest nivell de fracturació depèn del nivell de meteorització de la roca.

### 5.2 Riscs geològics. Geotècnic

Segons la cartografia de l'IGME, el parc d'aerogeneradors es troba en la fulla de Tudela. Segons aquesta fulla, eixa zona es classifica com III4. La regió III indica que es troba en sediments terciaris i quaternaris. Per altra banda, l'àrea 4 significa que les formes del relleu són molt variables, des de planes a molt acusades. A més a més, a la seua composició litològica apareixen algeps.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)



Figura 5: Risc geològic al parc eòlic

Les condicions constructives són marcades mitjançant el color verd com podem observar al mapa geotècnic de l'àrea d'estudi. D'aquesta manera, les condicions constructives són acceptables. De totes maneres, pot presentar alguns problemes per tindre una litologia molt variada i materials de diferents característiques. També cal tenir en compte, la possible aparició de seients degut a la dissolució dels algeps.

## 6 Expansivitat

Per a l'anàlisi d'expansivitat s'ha recorregut al Mapa publicat per l'institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E) Previsor de Riscs per Expansivitat de argiles.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)

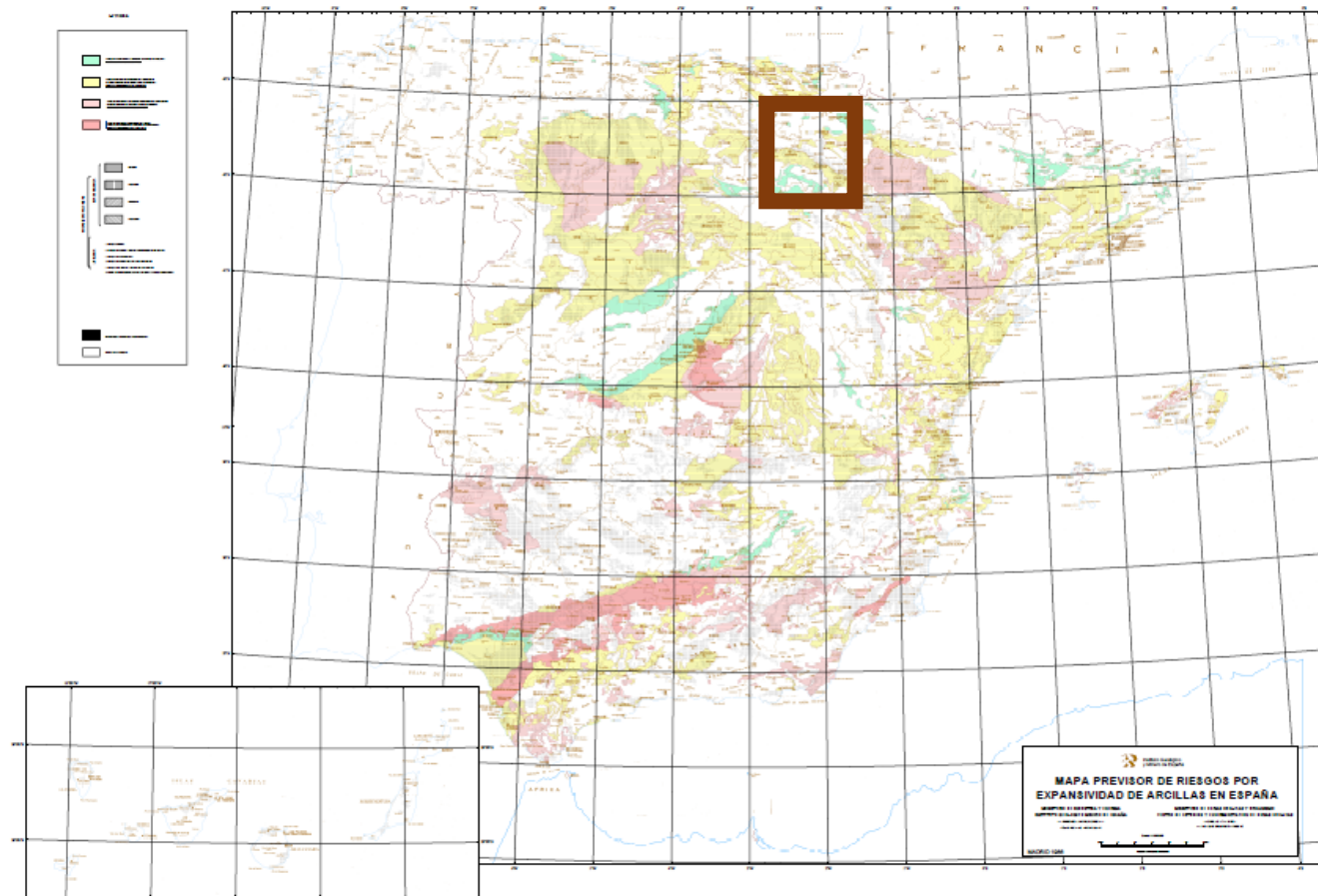


Figura 6: Risc d'expansivitat d'argiles a Espanya

Segons el mapa superior, on es localitza la zona d'estudi, el color es blanc, d'aquesta manera, indica que es tracta d'un substrat no argilós i, per tant, no presenta risc d'expansivitat.

A la següent imatge es pot observar de manera més detallada la zona que interessa per a aquest estudi i la llegenda d'aquesta situació.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)

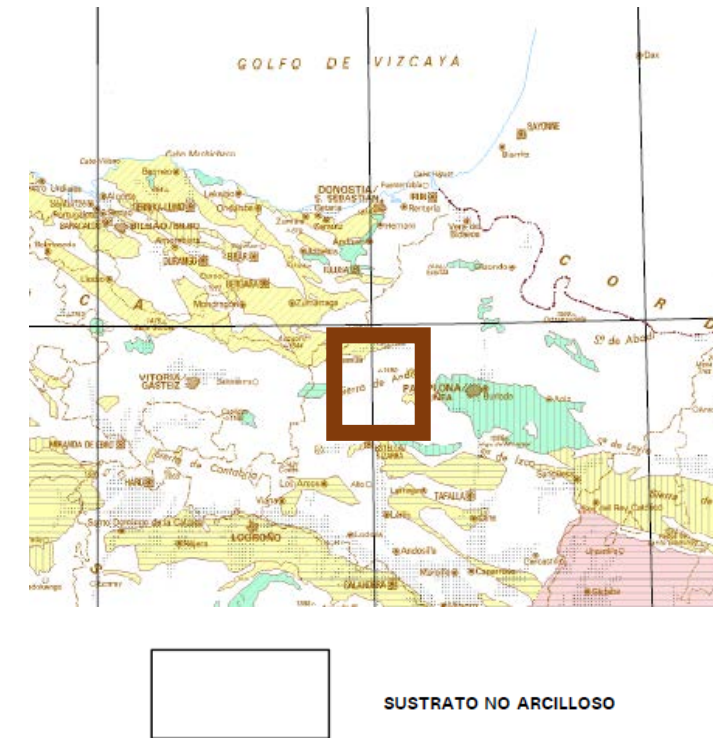


Figura 7: Risc d'expansivitat d'argiles a la Comunitat Foral de Navarra

Com es mostra a la figura adjuntada anteriorment, la zona d'estudi on es localitzarà el parc eòlic no disposa de cap color, és blanca. D'aquesta manera, com indica la llegenda, es tracta de substrat no argilós.



## 7 Karstificació

Com es pot observar a la imatge del mapa de karstificació, publicat també per l'institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E), el parc eòlic es localitza en una zona denominada com mitjanament karstificable, inclús de vegades amb importants karst. A més a més, el material és algeps.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)

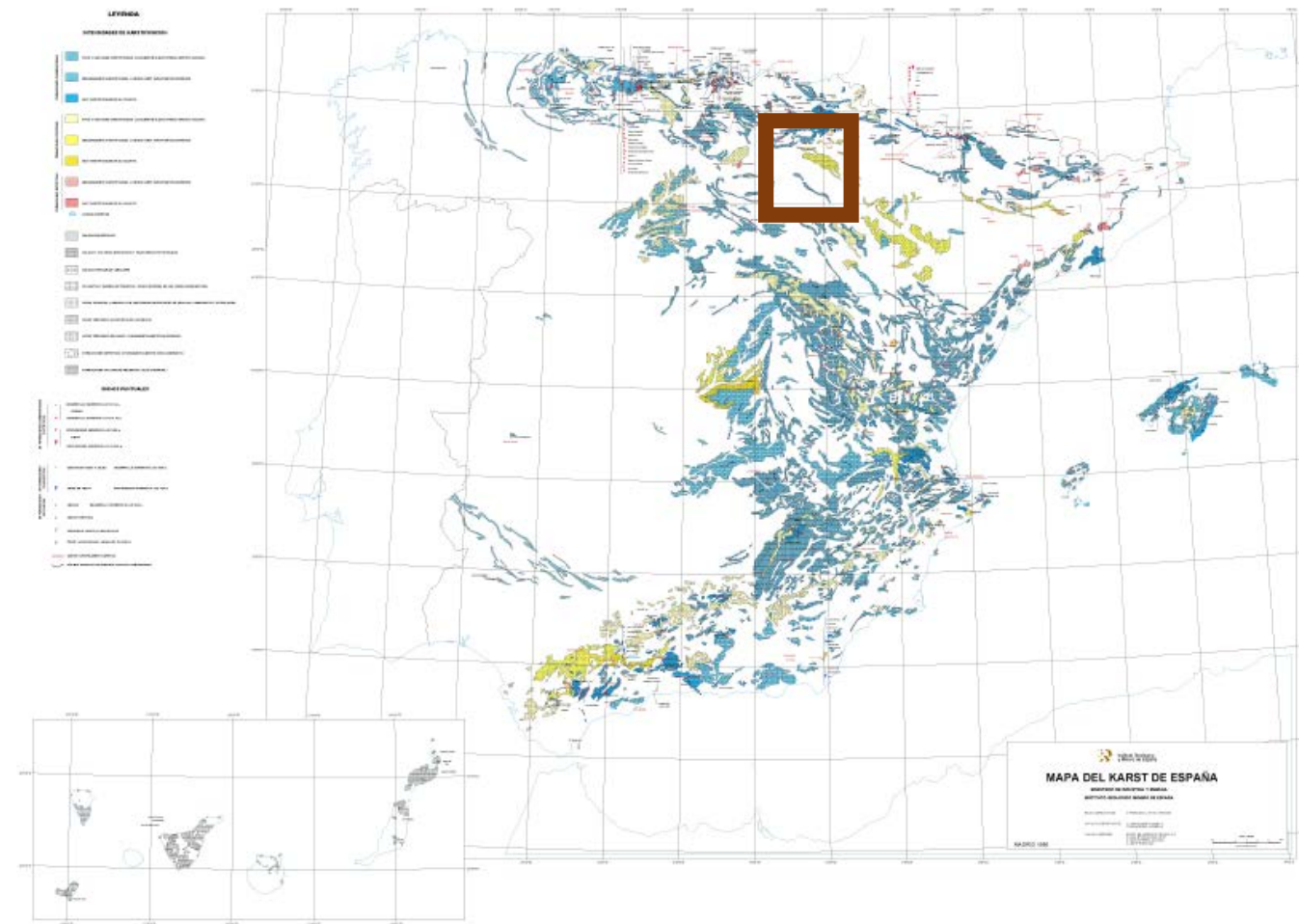


Figura 8: Mapa de karstificació a Espanya

A la següent imatge s'observa de manera més detallada la zona que interessa per a aquest estudi i la llegenda d'aquesta situació.

Com es pot observar a la següent figura, la zona d'estudi està marcada pel color groc. Aquest indica la presència de formacions d'algeps karstificades. A més a més, el símbol que s'aprecia indica algeps horitzontals del Miocè.

Font: Institut geològic i miner d'Espanya (I.G.M.E)

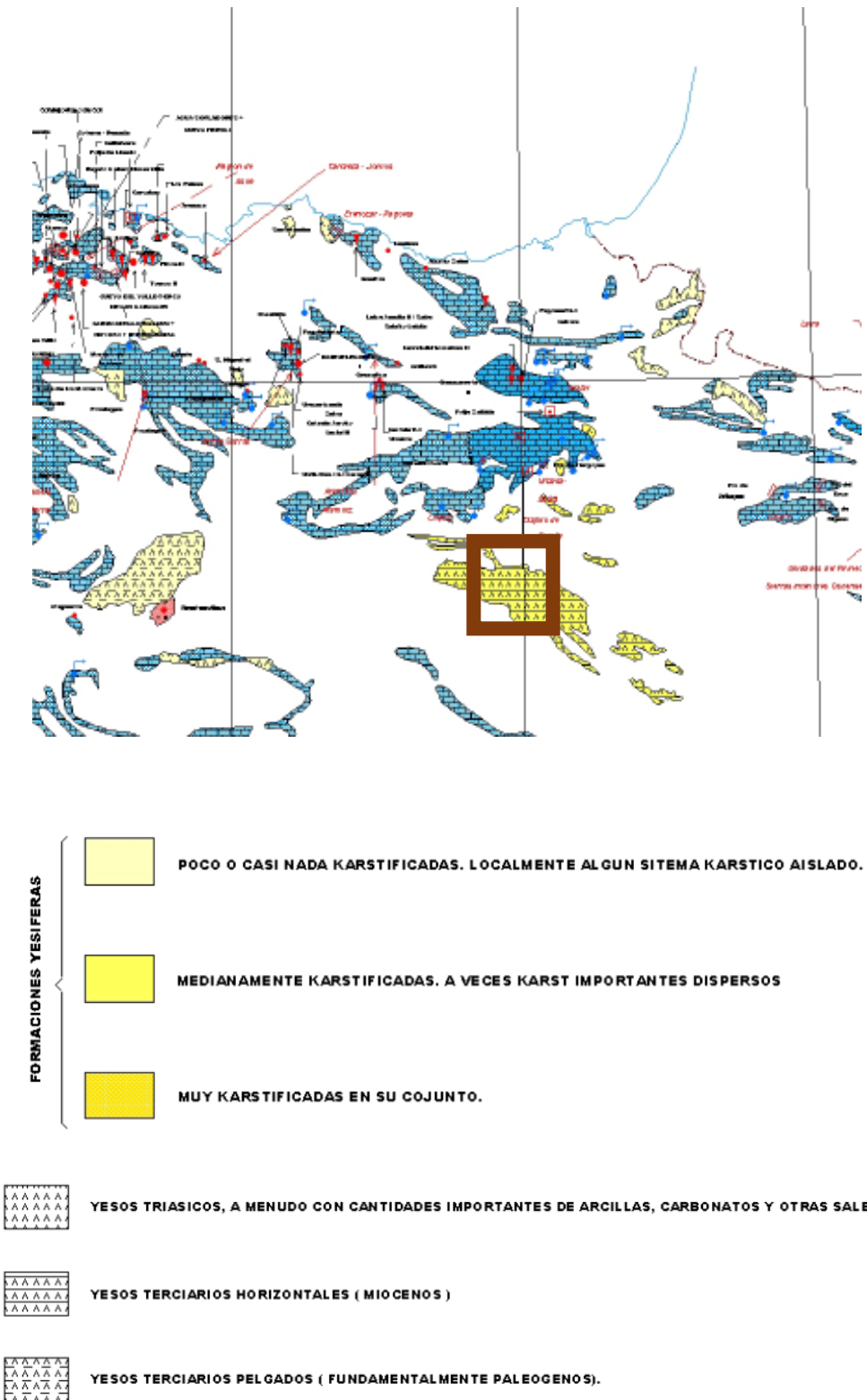


Figura 9: Karstificació a la Comunitat Foral de Navarra

Cal recordar que la karstificació es tracta d'un fenomen que es produeix principalment en algeps i calcàries, i com a conseqüència d'aquest material té lloc el procés de dissolució. Aquest fenomen pot provocar buits els quals es poden enfonsar bruscament i, seguidament provocar problemes estructurals.

Per a que es produeixi la karstificació cal donar-se simultàniament els fenòmens següents:

- La existència de materials evaporítics
- Presència d'aigua
- Existència de porus
- Existència de fissures

Segons els sondejos realitzats no s'ha detectat cap índex de cavitat, ja que pràcticament el 100% del material es recupera. De totes maneres, no es pot descartar els processos de karstificació en aquesta zona ja que existeixen informes de projectes prop de la zona d'estudi on està present aquest fenomen.



## 8 Sismicitat

L'objectiu principal d'aquest apartat és proporcionar els criteris que han de seguir-se per a tindre en consideració l'acció del sisme segons la norma Sismorresistent (NCSE-02).

L'acceleració bàsica en la zona on es troba localitzat el parc eòlic, com es mostra al mapa sísmic de la norma sismorresistent NCSE-02, és menor a 0,04g. Per tant, com s'indica en la norma no es necessari l'aplicació en les edificacions o obres quan l'acceleració sísmica bàsica siga inferior a 0,04g. El paràmetre g indica l'acceleració de la gravetat.

Font: Norma de construcció sismorresistent: Part general i edificació (NCSE-02)

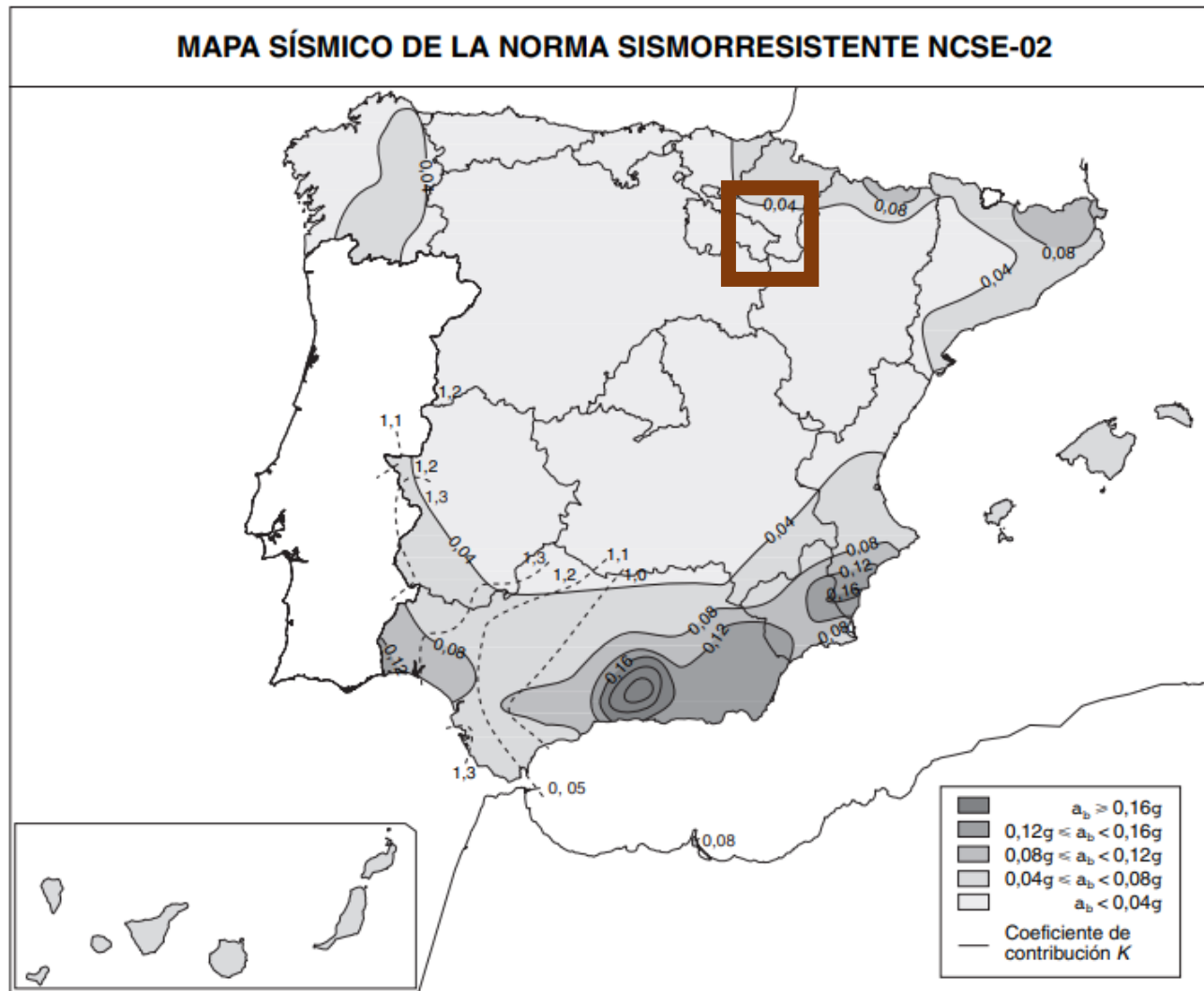


Figura 10: Perfil litològic de les ubicacions dels aerogeneradors

Com s'ha establert anteriorment, la norma Sismorresistent no és d'aplicació en el present cas, ja que la ubicació del parc es troba localitzada en una posició on l'acceleració bàsica és inferior a 0,04g. Tanmateix, s'ha realitzat assajos sísmics (MASW) els quals s'analitzaran també en aquest document. Aquests assajos principalment seran necessaris per a l'obtenció del mòdul dinàmic ja que les estructures que conformen els aerogeneradors no són

estàtiques sinó que produeixen una sèrie de moviment en la torre i aquests són transmesos com a càrregues puntuals a la sabata de l'aerogenerador.

## 9 Investigació en camp / in situ

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

- 5 sondejos amb extracció contínua de testimonis en cada cimentació dels aerogeneradors
- 34 assajos SPT distribuïts al llarg de les 5 ubicacions finals
- 18 assajos de resistència a la càrrega puntual localitzats com l'SPT al llarg la ubicació de cada aerogenerador
- 23 assajos de sísmica passiva
- 10 sondatges mecànics localitzats a les plataformes per a executar els aerogeneradors

La ubicació de la major part dels assajos realitzats al camp és en la futura posició projectada per a cada aerogenerador a excepció de l'assaig "sísmica passiva". Aquest assaig varia de la posició final dels aerogeneradors ja que es va realitzar en la posició proposta en un inici i després no va resultar com a la ubicació definitiva de les torres del aerogeneradors.

Per altra banda, al present apartat, es detallarà com s'ha realitzat la recopilació i anàlisi de les dades de partida, el criteri utilitzat per la eliminació de paràmetres atípics, el tractament de les dades inicials característiques del terrenys per correlacionar paràmetres derivats d'aquests i una sèrie de paràmetres final per al disseny de les cimentacions dels 5 aerogeneradors.

### 9.1 Sondejos

En primer lloc s'han realitzat 5 sondejos de rotació exactament en les posicions projectades per la ubicació dels aerogeneradors. En aquesta campanya geotècnica, els sondejos tenen una profunditat entre 25 metres i 25'5 metres. Per altra banda, també s'ha instal·lat una canonada de PVC per a poder mesurar el nivell freàtic a l'interior dels sondejos.

Aquest tipus de sondeig, s'utilitza per al reconeixement del terreny i la profunditat que aconsegueix és major que altres perforacions com el sondatge. A més a més, un dels avantatges que té la realització d'aquest tipus de sondejos, és la obtenció de mostres del terreny que posteriorment són analitzades al laboratori per a aconseguir diferents paràmetres interessants com l'agressivitat del terreny en funció del contingut de sulfats.

Per altra banda, el sondeig de rotació pot aconseguir perforar fins a una profunditat de 100 metres i traspasar qualsevol tipus de sòl i roca. Com s'ha comentat abans, el sondeig té la capacitat d'extraure testimonis de forma contínua i, en la gran majoria de casos, el percentatge de recuperació és bastant elevat.

La classificació de cada formació s'ha realitzat segons el criteri de meteorització de Ramírez Oyanguren i Lancha (1979). La roca sana es considera grau I, i conforme aquesta va meteoritzant-se, el seu grau incrementa...IB, II, IV-III.

La testificació que s'ha pogut realitzar a partir dels 5 sondejos, és a dir, el perfil litològic de cada ubicació dels aerogeneradors es mostra en la següent taula. A més a més, cada sondeig inclou la profunditat de cada estrat.

EL criteri que s'utilitza per a la descripció del sondejos es el proposat en la Societat Internacional de Mecànica de Roques (I.S.M.R)

Font: I.S.M.R Societat Internacional de Mecànica de Roques

Formació	Denominació	Criteris de reconeixement
I	Sana	No hi ha indicis d'alteració de la roca matriu
IB	Dèbilment meteoritzada	Decoloració de discontinuïtats principals
II	Lleugerament meteoritzada	La roca matriu pot estar decolorada i ser més dèbil que en el seu estat sa
III	Moderadament meteoritzada	Menys de la meitat del roca desintegrat
IV	Molt meteoritzada	Més de la meitat de la roca desintegrada

Figura 11: Criteris de reconeixement de roques

Per tant, com es mostra a la figura anterior, la formació I fa referència a no meteoritzada i la formació IV correspon a una formació molt meteoritzada. Com es lògic, i es pot demostrar en la taula dels diferents sondejos, les capes superficials tindran un grau de meteorització major que les capes que es troben a més profunditat.

Font: Documentació de partida

Profunditat (m)		Perfil litològic de cada sondeig								
De	A	Sondeig 1	Sondeig 2	Sondeig 3	Sondeig 5	Sondeig 6				
0	0,5	Terra vegetal	Terra vegetal	Terra vegetal	Llims amb nòduls de roca d'algeps	Terra vegetal				
0,5	1	Argila llimosa	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses amb nòduls de roca d'algeps	Argiles llimoses	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, amb nòduls de roca d'algeps	Llims argilosos amb nòduls de roca d'algeps				
1	1,5	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses amb nòduls de roca d'algeps	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes i nòduls d'algeps						
1,5	2			Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses amb nòduls de roca d'algeps		Substrat rocós alterat grau IV-III, argila margosa, amb nòduls de roca d'algeps				
2	2,5									
2,5	3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	Substrat rocós alterat grau IB, algeps laminats.	Substrat rocós alterat grau IB, algeps laminats.	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, amb nòduls de roca d'algeps	Substrat rocós alterat grau II, amb nòduls d'algeps				
3	3,5	Substrat rocós alterat grau IB. Molta fracturació					Substrat rocós alterat grau IB, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	Substrat rocós alterat grau IB, algeps laminats.	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, amb nòduls de roca d'algeps	Substrat rocós IB format per algeps laminats
3,5	4									
4	4,5									
4,5	5									
5	5,5									
5,5	6									
6	6,5									
6,5	7									
7	7,5									
7,5	8									
8	8,5									
8,5	9									
9	9,5									
9,5	10									
10	10,5									
10,5	11									
11	11,5									
11,5	12									
12	12,5									
12,5	13									
13	13,5									
13,5	14									
14	14,5									
14,5	15									
15	15,5									
15,5	16									
16	16,5									
16,5	17									
17	17,5									
17,5	18									
18	18,5									
18,5	19									
19	19,5									
19,5	20									
20	20,5									
20,5	21									
21	21,5									
21,5	22									
22	22,5									
22,5	23									
23	23,5									
23,5	24									
24	24,5									
24,5	25									
25	25,5									
		Substrat rocós alterat grau IB. Molta fracturació	Substrat rocós format per algeps laminats. Presenta fractures obertes.	Substrat rocós format per algeps laminats. Fractures obertes	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats				
15,5	16									
16	16,5									
16,5	17									
17	17,5									
17,5	18									
18	18,5									
18,5	19									
19	19,5									
19,5	20									
20	20,5									
20,5	21									
21	21,5									
21,5	22									
22	22,5									
22,5	23									
23	23,5									
23,5	24									
24	24,5									
24,5	25									
25	25,5									
		Substrat rocós format per margues, margues d'algeps i algeps laminats			°Substrat rocós sa format per algeps laminats					

Figura 12: Perfil litològic de les ubicacions dels aerogeneradors

Font: Elaboració pròpia

Com es pot observar, ja que la distància entre els aerogeneradors és menuda, el perfil litològic de les 5 posicions és bastant semblant. A més a més, principalment està format per substrat rocós meteoritzat en diferents graus. D'aquesta manera, per a optimitzar el disseny de les cimentacions del parc eòlic, s'han agrupat en un sol model el perfil litològic en funció de les dades disponibles. Posteriorment, es mostra el perfil litològic emprat per al disseny de les 5 cimentacions

Cal destacar que la terra vegetal forma part del perfil litològic proposat. Tanmateix, tan aquesta capa com la d'argiles es retirarà en obra ja que la base de la cimentació de la sabata està per baix d'aquest pla i s'omplirà amb farcit d'unes característiques geotècniques més òptimes que les que disposa la terra vegetal. Per tant, no és necessari associar paràmetres geotècnics a aquestes capes, sols són necessaris els paràmetres del macís rocós. Generalment, la terra vegetal no es convenient que siga utilitzada com a farcit ja que és un terreny que sol tindre arrels, herba, etc., i normalment es destinada a un abocador o utilitzar-se per a sembrar. A part, normalment, la capa de terra vegetal sol tindre un espessor entre 10 i 50 cm i quan s'executa l'obra es retira mitjançant l'activitat de desbrossament.

Profunditat (m)		Perfil litològic proposat
De	A	
0	0,5	Terra vegetal
0,5	11	Argila llimosa
1	1,5	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps
1,5	2	
2	2,5	
2,5	3	
3	3,5	
3,5	4	
4	4,5	Substrat rocós alterat grau II, amb nòduls d'algeps
4,5	5	
5	5,5	
5,5	6	Substrat rocós IB format per algeps laminats
6	6,5	
6,5	7	
7	7,5	
7,5	8	
8	8,5	
8,5	9	
9	9,5	
9,5	10	
10	10,5	
10,5	11	Substrat rocós sa
11	11,5	
11,5	12	
12	12,5	
12,5	13	
13	13,5	
13,5	14	
14	14,5	
14,5	15	
15	15,5	
15,5	16	
16	16,5	
16,5	17	
17	17,5	
17,5	18	
18	18,5	
18,5	19	
19	19,5	
19,5	20	
20	20,5	
20,5	21	
21	21,5	
21,5	22	
22	22,5	
22,5	23	
23	23,5	
23,5	24	
24	24,5	
24,5	25	
25	25,5	

Figura 13: Perfil litològic proposat

A continuació, una vegada realitzat cada sondeig, s'ha procedit al mesurament del nivell de l'aigua a l'interior del sondeig introduint una canonada de PVC en ell.

Les dades proporcionades respecte al nivell freàtic s'han organitzat en la següent tabla:

Font: Documentació de partida

	Nivell freàtic (m)								
	15/02/2020	22/02/2020	01/03/2020	04/03/2020 abans de buidar	04/03/2020 després de buidar	04/03/2020 última mesura	09/03/2020 abans de buidar	09/03/2020 després de buidar	09/03/2020 última mesura
S.1	0,9	0,8	2,3	2,6	16,2	14,4	9,8	16,2	14,4
S.2	2	2,1	2,2	2,3	16,6	13,3	6,5	16,8	13,2
S.3	2,45	2,7	2,9	2,8	16	16	16,3	16	15,9
S.5	20	20	19,9	20	19,9	15,5	20,5	20,2	20,3
S.6	8,35	9,4	9,3	9,3	15,9	15,6	11,9	16,5	15,3

Figura 14: Mesures nivell freàtic

Com es pot analitzar a partir del quadre anterior, el dia 1 de març del 2020, la profunditat del nivell freàtic dels sondejos 1,2 i 3 es situa al voltant del 2-3 metres. Tanmateix, la profunditat de l'aigua en els sondejos 5 i 6, està situada molt per davall. Observant les dades en les qual es pot llegir "abans de buidar, després de buidar i últim mesurament", sembla que es realitza el mesurament del nivell freàtic uns dies després en diferents condicions.

Si es presta atenció a la columna del 4 de març del 2020, l'ordre de magnitud sembla similar a l'obtingut el dia 1 de març del 2020. Tanmateix, després de buidar el sondeig el dia 4 de març del 2020, el nivell freàtic dels sondejos 1,2 i 3, varia notablement fins a 16-17 metres. Passades unes hores del mateix dia 4 de març del 2020, el nivell freàtic del aigua incrementa ràpidament uns 2-3 metres. El mateix procediment es realitza el dia 9 de març de 2020, tenint com a resultat el mateix que el dia 4 de març, és a dir, un ascens considerable del nivell de l'aigua dels sondejos 1,2 i 3 passades unes hores després de buidar el sondeig.

Per tant, es pot concloure una vegada analitzades les dades de partida el següent. Davant aquest resultat, seria convenient realitzar un control periòdic del nivell freàtic per a ratificar si es tracta d'un nivell freàtic o de la pròpia aigua que es queda com a conseqüència del sondeig.

El disseny dels fonaments dels aerogeneradors ha tingut en compte les dades de la columna del dia 4 de març "després de buidar". El motiu principal ha sigut que degut a la proximitat de la ubicació dels aerogeneradors, l'ordre de magnitud del nivell freàtic deu ser semblat. Tanmateix, com s'ha expressat anteriorment, es deuria de realitzar una campanya de seguiment del nivell freàtic al llarg d'uns mesos per a verificar si es tracta del nivell freàtic de la zona o de l'aigua utilitzada per a realitzar el sondeig de rotació.

D'aquesta manera, a continuació, es mostra una tabla amb els nivells freàtics de cada sondeig el dia 4 de març "després de buidar" i la mitjana de tots els paràmetres.

Font: Elaboració pròpia

	Nivell freàtic (m)
	04/03/2020 després de buidar
Sondeig 1	16,2
Sondeig 2	16,6
Sondeig 3	16
Sondeig 5	19,9
Sondeig 6	15,9
Mitjana	17

Figura 15: Mesures nivell freàtic 4 de març del 2020 per al disseny de les cimentacions

Per tant, com s'han unificat tots els perfils litològics en un sol, el nivell freàtic emprat per al disseny és de 17 metres.

## 9.2 Sondatges mecànics de reconeixement

S'han excavat 10 sondatges per a poder estudiar-se al laboratori i establir paràmetres necessaris per al disseny de les cimentacions. Aquests estan ubicats a la plataforma de muntatge dels aerogeneradors, localitzada just a la part contigua de la posició final dels aerogeneradors. Per tant, el material obtingut es representatiu de la localització definitiva.

Mitjançant aquest mètode, es poden aconseguir paràmetres com la litologia del terreny, mostres per a ser estudiades al laboratori, obtenció de paràmetres resistents, detecció de la presència de nivell freàtic...

## 9.3 SPT

Durant la realització de sondejos s'ha realitzat aquest assaig "SPT" de penetració dinàmica "in situ". A continuació s'explica en que es basa aquest assaig.

Es tracta d'introduir al terreny un pren mostra al llarg de 60 cm. Es comptabilitzaran els cops necessaris per a introduir 15 cm. El colp es realitza mitjançant una maça normalitzada d'un pes de 63,5 kg i des d'una altura de 76 cm. Cal tenir en compte que els cops del primer i últim tram no es tenen en compte ja que poden no ser representatius del terreny. Tal vegada, el primer tram pot estar alterat i l'últim tram sobrecompactat. D'aquesta

manera, els cops que es consideraran per a l'obtenció de la resistència de penetració estàndard, serà la dels dos trams centrals. En el cas en què el número de cops necessaris fora superior a 50, es considerarà rebuig.

A la tabla següent, s'han recopilat tots els SPT realitzats:

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Profunditat (m)	Valor SPT	Formació
1	1,45-1,82	23-35-50 (R↓7)	IV-III
1	4,40-4,48	50 (R↓8)	IB
1	5,90-6,33	21-35-50 (R↓13)	IB
1	7,70-7,83	50 (R↓13)	IB
1	9,20-9,80	15-16-19-21	IB
1	9,80-10,33	24-31-43-50 (R↓8)	IB
1	15,80-16,21	23-25-50 (R↓11)	IB
1	24,80-24,89	50 (R↓9)	I
2	1,50-1,68	44-50 (R↓3)	II
2	3,10-3,30	47-50 (R↓5)	II
2	9,00-9,25	35-50 (R↓10)	IB
3	1,50-1,88	12-38-50 (R↓8)	II
3	3,15-3,25	50 (R↓10)	IB
3	4,60-4,64	50 (R↓4)	I
5	1,10-1,37	23-50 (R↓13)	IV-III
5	2,15-2,75	22-50-21-25	IV-III
5	3,20-3,55	14-31-50 (R↓5)	IV-III
5	4,40-4,65	16-50 (R↓10)	IV-III
5	5,50-6,10	6-11-13-12	IV-III
5	6,70-6,84	50 (R↓14)	IV-III
5	7,60-8,15	15-40-48-50 (R↓5)	II
5	8,90-9,03	50 (R↓13)	II
5	10,25-10,29	50 (R↓4)	I
5	13,15-13,22	50 (R↓7)	I

Sondeig	Profunditat (m)	Valor SPT	Formació
5	17,75-17,86	50 (R↓11)	I
6	1,00-1,60	10-20-20-20	IV-III
6	2,00-2,43	14-46-(R↓13)	IV-III
6	3,50-3,79	31-(R↓14)	II
6	5,00-5,05	(R↓5)	II
6	7,40-7,48	(R↓8)	I
6	9,70-9,77	(R↓7)	I
6	12,50-12,60	(R↓10)	I
6	15,30-15,34	(R↓4)	I
6	18,80-18,82	(R↓2)	I

Figura 16: Profunditat i valors del assajos SPT

Com s'observa, hi ha alguns casos on sembla que el resultat obtingut mitjançant l'SPT siga bastant inferior a 50, Aquest resultat és degut a les xicotetes capes menys competents que es troben al macís rocós i, per tant, no són representatives del macís rocós a escala general. Tanmateix la major part de les vegades en que s'ha realitzat, el resultat de l'assaig està prop de 50 i inclús rebuig. D'aquesta manera, es pot afirmar que es tracta o bé d'un terreny molt dur o de roca, com es el cas que s'analitza en aquest treball de fi de màster.

A continuació es mostra un extracte de la informació de partida proporcionada per l'empresa on principalment es pot observar mitjançant fotografies com és el terreny que es troba al parc eòlic quan es realitzen els sondejos. Concretament la imatge adjuntada pertany al sondeig 3 corresponent a la situació de l'aerogenerador 3. Com es pot observar, la recuperació del testimoni es pràcticament el 100% i el material és molt consistent ja que es tracta de roca.

A més a més, a part de les imatges del terreny i l'SPT, també s'observa informació respecte a la descripció del perfil litològic, el RQD, la compressió simple i el pressiómetre.



Font: Informació de partida

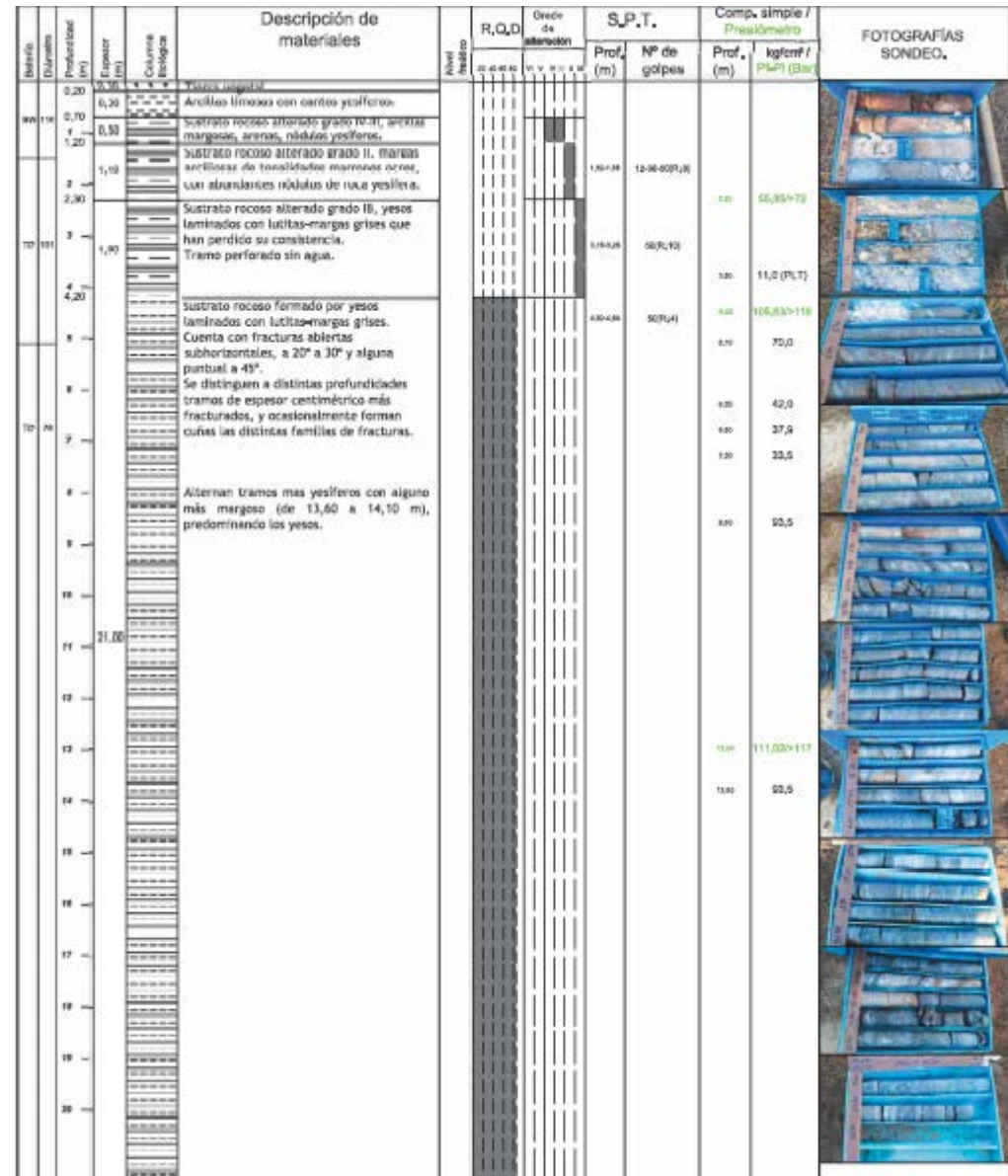


Figura 17: Sondeig 3

### 9.4 PLT: Assaig de resistència a la càrrega puntual

Aquest assaig també anomenat *Point load test* té com a finalitat l'obtenció de la compressió simple de fragments de roca a partir del paràmetre  $I_s$  que s'obté mitjançant aquest assaig.

L'assaig de resistència a càrrega puntual consisteix en trencar un fragment de roca utilitzant dos puntes còniques metàl·liques. Aquest mètode es realitza tant de forma paral·lela com perpendicular al pla d'estratificació. A partir de la càrrega de trencament, s'obté l'índex  $I_s$ , com s'ha exposat anteriorment, a partir d'unes correlacions que s'estudiaran a continuació es pot obtenir la compressió simple de la roca. Cal remarcar que el diàmetre normalitzat per a realitzar aquest assaig és de 50 mm, d'aquesta manera, si el diàmetre és diferent, es corregirà el valor de  $I_s$ .

El paràmetre que s'obté mitjançant aquest assaig, com ja s'ha anomenat, és el de compressió simple. Aquest paràmetre és el mateix que s'aconsegueix mitjançant l'assaig uniaxial. En aquest últim assaig assenyalat, l'obtenció d'aquest paràmetre és de forma directa i està més estandarditzat ja que té en compte tota la roca per a l'obtenció de la compressió simple, a diferència del PLT que sols té en compte un fragment de la roca.

Cal aclarir, que es tracta d'un assaig que es realitza a un fragment petit de roca si ho comparem en la escala general. Per tant, pot ser que el valor final aconseguit resulte més menut de l'esperat ja que pot ser que en eixe xicotet fragment hi haja una fissura i no represente l'estat general del macís. Per altra banda, pot succeir tot el contrari. Pot ser, el fragment que s'estudia és molt homogeni i no està considerant les fractures que pot tindre el conjunt més gran, ja que quan es redueix tot a una escala molt menuda, hi ha molta més dispersió. D'aquesta manera, serà més correcte utilitzar l'assaig uniaxial per aconseguir la compressió simple.

En aquest punt tractarem les dades obtingudes a l'assaig PLT. Tanmateix, a l'apartat d'assajos de laboratori s'analitzarà l'assaig uniaxial, el qual, com s'ha indicat anteriorment és un assaig directe.

Per a la recopilació i anàlisi de dades, en primer lloc s'ha realitzat una tabla organitzant tota la informació de partida com podem observar a continuació. A la tabla es pot observar el sondeig en què s'ha realitzat l'assaig, la profunditat i la formació que hi ha a eixa ubicació.

La dada de partida és el  $I_s$  (50), és a dir, la resistència a càrrega puntual corregit per a un diàmetre de 50 mm. A partir d'aquest valor en les unitats de  $\text{kg/cm}^2$  s'obindrà el valor de compressió simple dels diferents fragments de roca (UCS, kPa). Per a aconseguir aquest valor es correlaciona mitjançant la següent expressió de Quane and Russel (2003).

Font: Quane and Russel (2003)

$$\begin{aligned} \text{UCS} &= 24.4 \text{ PLI (Strong rocks)} \\ \text{UCS} &= 3.86(\text{PLI})^2 + 5.65\text{PLI (Weak rocks)} \end{aligned}$$

Figura 18: Compressió simple a partir de l'assaig PLT

Seguidament es mostra la tabla anomenada prèviament.

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	$I_s$ (50) (Mpa)	$I_a$ (50) Mpa	$I_s$ (50) (kg/cm <sup>2</sup> )	UCS (kg/cm <sup>2</sup> )	UCS (kPa)
1	4	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	0,05	1,99	0,5	3,79	379
1	4,5	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	0,55	1,35	5,5	147,84	14.784
1	9,2	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	0,02	3,75	0,2	1,28	128,44

Sondeig	Profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	Is (50) (Mpa)	Ia (50) Mpa	Is (50) (kg/cm2)	UCS (kg/cm2)	UCS (kPa)
2	3,3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	0,15	1,36	1,5	17,16	1.716
2	8,4	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	0,31	1,35	3,1	54,60	5.460
2	10,5	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	0,23	1,4	2,3	33,41	3.341
2	19,5	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	1,65	1,62	16,5	1.144	114.411
3	3,85	Substrat rocós alterat grau IB. Algeps laminats amb margues	IB	0,05	1,39	0,5	3,79	379
5	4,25	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	0,11	3,26	1,1	10,88	1088
5	5	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	0,27	5,05	2,7	43,394	4339
5	7	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	0,4	2,83	4	84,36	8436
5	8,55	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	0,52	3,94	5,2	133,75	13.375
5	9,8	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	0,6	1,86	6	172,86	17.286
6	3,3	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	0,1	5,04	1	9,51	951
6	3,9	Substrat rocós alterat grau II amb nòduls d'algeps	II	0,07	3,11	0,7	5,84	584,64
6	5,55	Substrat rocós IB format per algeps laminats amb margues	IB	0,02	1,99	0,2	1,28	128,44
6	6,15	Substrat rocós IB format per algeps laminats amb margues	IB	0,07	5,76	0,7	5,84	584,64
6	7,05	Substrat rocós IB format per algeps laminats amb margues	IB	0,19	2,09	1,9	24,66	2.466

Figura 19: Recopilació dades assaig de resistència a la càrrega puntual

Seguidament, s'ha indicat per a cada formació, els paràmetres que es disposen, tenint en compte també en quin sondeig s'ha obtingut:

Font: Elaboració pròpia

	IV-III		II		IB		I	
	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)
Sondeig 1	-	-	-	-	379	4	-	-
	-	-	-	-	14.784	4,5	-	-
	-	-	-	-	128,44	9,2	-	-
Sondeig 2	-	-	1.716	3,3	5.460,96	8,4	3.341,44	10,5
	-	-	-	-	-	-	114.411	19,5
Sondeig 3	-	-	-	-	379	3,85	-	-
Sondeig 5	1.088,56	4,25	13.375,44	8,55	-	-	17.286	9,8
	4.339,44	5	-	-	-	-	-	-
	8436	7	-	-	-	-	-	-
Sondeig 6	951	3,3	584,64	3,9	128,44	5,55	-	-
	-	-	-	-	584,64	6,15	-	-
	-	-	-	-	2.466,96	7,05	-	-

Figura 20: Anàlisi dades assaig de resistència a la càrrega puntual en funció de la formació i sondeig

A continuació, s'ha analitzat que les dades de cada formació estan dins d'un mateix ordre de magnitud i que no hi ha dades atípiques. A més a més, en les formacions que es disposen de més dades, s'ha realitzat un anàlisi estadístic mitjançant els diagrames *box-whiskers*. Aquest anàlisi estadístic s'explica en l'apart de l'assaig uniaxial ja que es tracta d'un assaig directe per a aconseguir la compressió simple.

Després de realitzar diferents estudis estadístics mitjançant el diagrama de *box-whiskers*, el valor II, no sembla un valor fiable ja que es tracta de la formació II. D'aquesta manera, sembla que el valor que havíem exclòs anteriorment, com a valor atípic sí forma part de la resta de valors. S'explica més detalladament a l'apart de l'assaig uniaxial.

### 9.5 Sísmica passiva (mòdul dinàmic)

Mitjançant el present assaig es poden determinar les característiques del terreny fent ús de les velocitats d'ona s. Aquest paràmetre depèn de la cohesió i integritat del terreny. D'aquesta manera, la velocitat d'aquestes ones és més elevada quan el terreny presenta més integritat. D'aquest mode, en el cas que es presenta, quan la roca quede classificada amb un grau inferior, la velocitat d'aquesta ona serà major que quan la integritat de la roca siga d'una menor qualitat.



Com s'ha comentat a l'inici d'aquesta secció, aquest assaig no s'ha realitzat a l'emplaçament final ja que la posició no va ser la definitiva. D'aquesta manera, hi ha valors que són molt pròxims a la ubicació actual i altres que queden allunyats.

L'objectiu principal d'aquest assaig és obtenir  $G$ , el mòdul dinàmic, ja que serà necessari per al disseny de les cimentacions verificant la rigidesa rotacional dinàmica.

Cal explicar el motiu pel qual es necessita l'obtenció del mòdul dinàmic. En primer lloc, explicar que el mòdul estàtic es aquell que s'obté mitjançant assajos com el pressiómetre. Com a exemple, faria referència a recolzar una sabata pressionant el terreny i aquesta acció es queda a llarg termini. Per tant, eixe terreny va deformant-se degut a la càrrega estàtica. El 90% de les obres d'enginyeria, s'empra el mòdul estàtic. Tanmateix, la present estructura es diferent ja que en els casos dels aerogeneradors, tenim una càrrega dinàmica pel moviment de les aspes del molí el que provoca que el suport, és a dir, la torre dels aerogeneradors realitzen uns moviments de costat a costat. Aquests moviments provocats a la torre, són transmesos a la sabata el que provoca que aquesta també tinga certs moviments.

Aquests moviments, també pressionen al terreny, però a diferència d'una estructura estàtica, és una pressió no constant, és a dir, estrenyent i descomprimint el terreny de manera repetitiva, provocant xicotets deformacions degudes a càrregues puntuals. Per tant, per a comprendre aquest problema de càrregues molt ràpides i dinàmiques s'empra el mòdul dinàmic mitjançant la velocitat de ona  $s$ .

Per a aconseguir el mòdul dinàmic, en primer lloc s'ha de calcular el mòdul  $G_0$  mitjançant una sèrie de correlacions dependents de la velocitats de les ones  $s$ .

Font: Elaboració pròpia

$$(1) \quad E_{\text{dyn}} = \rho_{\text{bulk}} V_s^2 \frac{(4V_s^2 - 3V_p^2)}{(V_s^2 - V_p^2)}$$

$$(2) \quad v_{\text{dyn}} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - 2V_s^2} \quad \boxed{G_0 = V_s^2 \rho}$$

$$(3) \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{\rho * v s^2 * \frac{(4v s^2 - 3v p^2)}{(v s^2 - v p^2)}}{2(1 + \frac{(v p^2 - 2v s^2)}{(2v p^2 - 2v s^2)})} = \frac{\rho * v s^2 * \frac{(4v s^2 - 3v p^2)}{(v s^2 - v p^2)}}{2 \left( \frac{2v p^2 - 2v s^2 + (v p^2 - 2v s^2)}{2(v p^2 - v s^2)} \right)}$$

$$G = \frac{\rho * v s^2 * \frac{(4v s^2 - 3v p^2)}{(v s^2 - v p^2)}}{\left( \frac{2v p^2 - 2v s^2 + (v p^2 - 2v s^2)}{(v p^2 - v s^2)} \right)} = \frac{\rho * v s^2 * \frac{(4v s^2 - 3v p^2)}{(v s^2 - v p^2)}}{\left( \frac{3v p^2 - 4v s^2}{(v p^2 - v s^2)} \right)} = \frac{\rho * v s^2 * \frac{(4v s^2 - 3v p^2)}{(v s^2 - v p^2)}}{\left( \frac{-3v p^2 + 4v s^2}{(-v p^2 + v s^2)} \right)}$$

(4)

(5)

$$G = \rho * v s^2$$

Figura 21: Relació del mòdul  $G_0$  amb la velocitat  $s$  de les ones

Per tant, el mòdul  $G_0$ , es pot relacionar sols amb les ones  $S$

Una vegada obtingut el mòdul  $G_0$ , per a poder realitzar el disseny de les cimentacions, s'ha d'utilitzar el mòdul dinàmic  $G$ . Aquest s'ha obtingut seguint les pautes indicades al document "Guidelines for design of wind turbines". Aquesta guia ha desenvolupat una sèrie de recomanacions per al disseny de diferents tipus de turbines.

Per obtenir la relació  $G/G_0$  s'ha d'observar el nivell de pressió. En funció del cas que s'estudia el valor serà un u altre. En el cas de vent, la relació es de  $10^{-2}$  i típicament es de  $10^{-3}$ .

Font: Guidelines for design of wind turbines- DNV

The following shear strain levels can be expected for the three most important sources of dynamic loading of soils:

- earthquakes: large strains up to  $10^{-2}$  to  $10^{-1}$
- rotating machines: small strains usually less than  $10^{-5}$
- wind and ocean waves: moderate strains up to  $10^{-2}$ , typically  $10^{-3}$

Figura 22: Fonts de càrrega dinàmica i esforç de tallant associat

Una vegada aconseguir el nivell de pressió, mitjançant la següent correlació es podrà obtenir el valor  $G/G_0$ .

Font: Guidelines for design of wind turbines- DNV

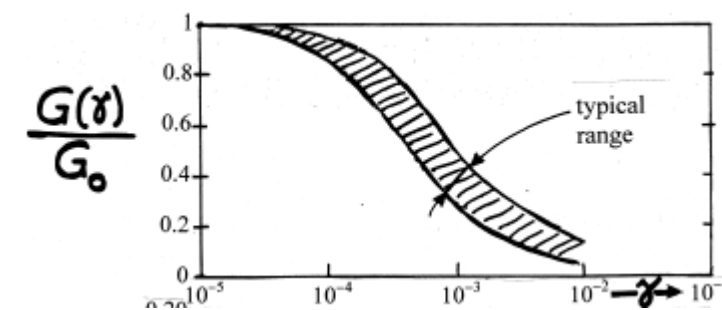


Figura 23:  $G/G_0$  en funció del esforç de tallant

Seguidament, aconseguit aquest paràmetres ( $G/G_0=0.35$ ), sols serà necessari multiplicar-lo per  $G_0$  per a aconseguir el mòdul dinàmic.

Com a exemple de dades de partida proporcionades per l'empresa, s'adjunten les velocitats de les ones s de la posició 6 de l'aerogenerador. Remarcar que la posició on s'ha realitzat aquest assaig no és la definitiva, però es localitza pròxima a aquesta.

S'observa un gràfic on es pot analitzar la variació de la velocitat de l'ona en funció de la profunditat. Aquest fenomen es degut a que quan el terreny es més competent la velocitat serà major. A més a més, en aquest gràfic es divideix el terreny en funció de les velocitats d'aquestes ones s.

Font: Informació de partida.

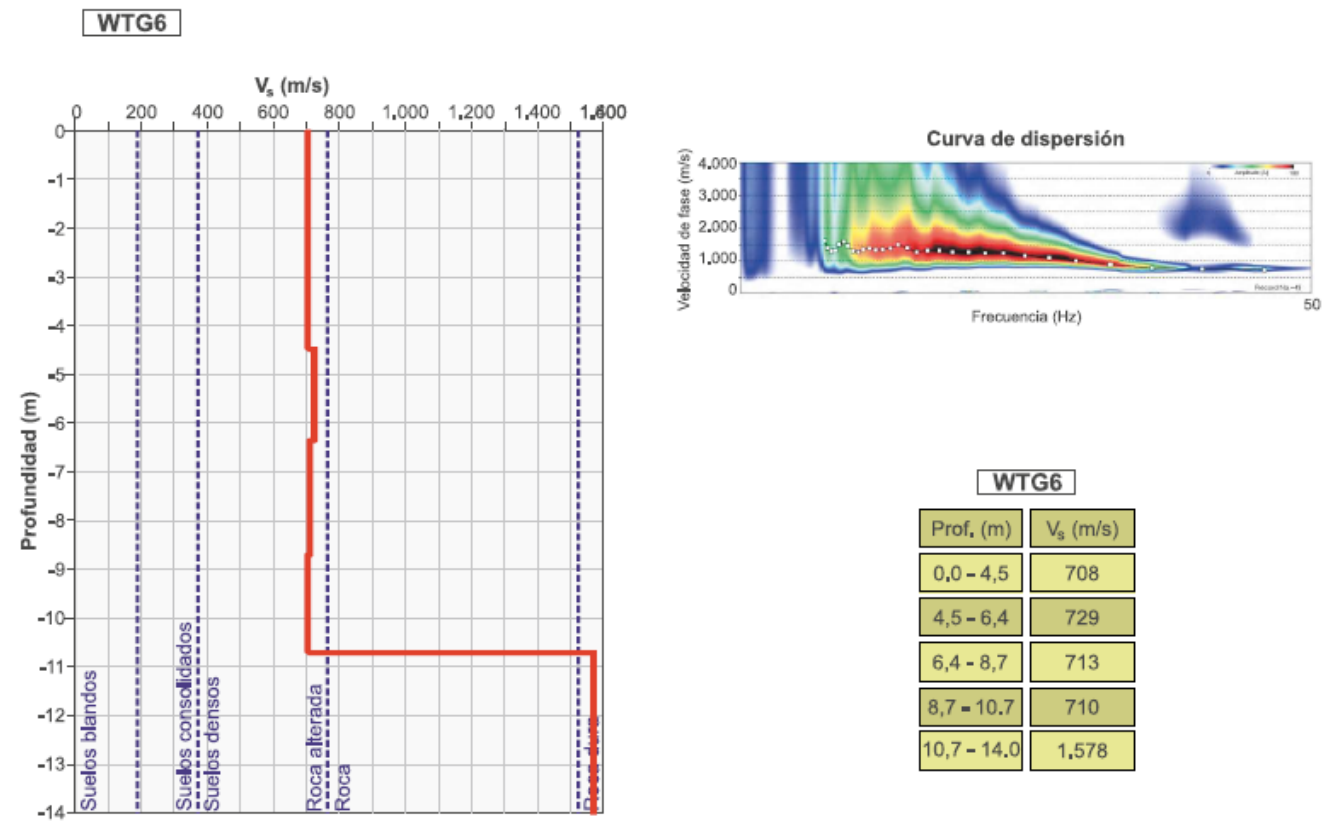


Figura 24: Velocitats ones s

A la tabla següent, es pot observar de manera ordenada la recopilació de les dades de partida i els diferents paràmetres que s'ha obtingut a partir d'ells.

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Profunditat (m)		Mitja Profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	Vs (m/s)	r (kN/m <sup>3</sup> )	n <sub>DIN</sub>	G <sub>0</sub> (MPa)	G <sub>DIN</sub> (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	E <sub>DIN</sub> (MPa)
	De	a										
1	0	1,7	0,85	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenas, nòduls d'algeps	IV-III	836	20	0,3	1398	489	3634	1272
1	1,7	3,9	2,8	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	877	21	0,3	1615	565	4199	1470
1	3,9	6,8	5,35	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	986	22	0,3	2139	749	5561	1946
1	6,8	10,2	8,5	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	812	22	0,3	1451	508	3771	1320
1	10,2	14	12,1	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	764	22	0,3	1284	449	3339	1169
2	0	1,2	0,6	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	355	21	0,3	265	93	688	241
2	1,2	3,9	2,55	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	1412	21	0,3	4187	1465	10886	3810
2	3,9	6,8	5,35	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	1551	22	0,3	5292	1852	13760	4816
2	6,8	10,2	8,5	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	1539	22	0,3	5211	1824	13548	4742
2	10,2	14	12,1	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	1537	23	0,3	5433	1902	14127	4944
3	0	2,4	1,2	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	1376	21	0,3	3976	1392	10338	3618
3	2,4	5,5	3,95	Substrat rocós alterat grau IB. Algeps laminats que han perdut la seua consistència	IB	1342	22	0,3	3962	1387	10302	3606
3	5,5	8,3	6,9	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	1389	23	0,3	4437	1553	11537	4038
3	8,3	14	11,15	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	1342	23	0,3	4142	1450	10770	3769
5	0	3,5	1,75	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	1049	20	0,3	2201	770	5722	2003
5	3,5	6,9	5,2	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	1054	20	0,3	2222	778	5777	2022
5	6,9	13,2	10,05	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	1198	23	0,3	3301	1155	8583	3004
5	13,2	14	13,6	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	1142	23	0,3	3000	1050	7799	2730
6	0	4,5	2,25	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, amb nòduls de roca d'algeps	IV-III	708	20	0,3	1003	351	2607	912
6	4,5	6,4	5,45	Substrat rocós grau IB format per algeps laminats	IB	729	22	0,3	1169	409	3040	1064
6	6,4	8,7	7,55	Substrat rocós grau IB format per algeps laminats	IB	713	22	0,3	1118	391	2908	1018
6	8,7	10,7	9,7	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	710	23	0,3	1159	406	3015	1055
6	10,7	14	12,35	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	1578	23	0,3	5727	2005	14891	5212

Figura 25: Recopilació dades assaig sísmica passiva

Abans de l'exposició de la informació de manera ordenada, es realitza un tractament de dades de les velocitats s per a verificar la concordança amb la formació assignada. Aquest procediment es realitza basant-se amb la tabla del "International Building code, IBC" per a la classificació de sòls.

Font: International building code

Clasificación	Tipo de suelo	Propiedades medias en los primeros 30 metros		
		Velocidad de ondas de cizalla ( $V_s$ , m/s)	SPT (N)	Resistencia al corte en condiciones saturadas ( $S_u$ , psf)
A	Roca dura	$V_s \geq 1,524$	No aplica	No aplica
B	Roca	$762 \leq V_s \leq 1,524$	No aplica	No aplica
C	Roca alterada Suebs muy densos	$365.7 \leq V_s \leq 762$	$N \geq 50$	$S_u \geq 2,000$
D	Sueb consolidados	$182.9 \leq V_s \leq 365.7$	$15 \leq N \leq 50$	$1,000 \leq S_u \leq 2,000$
E	Sueb blandos	$V_s < 182.9$	$N < 15$	$S_u < 1,000$
F	-	Terrenos con más de 10 pies de suelo con las siguientes características : 1. Índice de plasticidad $PI \geq 20$ 2. Contenido en agua $w \geq 40\%$ 3. Resistencia al corte en condiciones saturadas $S_u < 1,000$		
G	-	Suelos con una o más de las siguientes características : 1. Suelos vulnerables a fracturas o a colapsos en condiciones de sismicidad, tal como suelos licuables, arcillas sensibles o suelos escasamente cementados con facilidad para colapsar 2. Turbas y/o arcillas con alto contenido orgánico ( $H \geq 3.048m$ de turba y/o arcillas con alto contenido en materia orgánica, siendo H el espesor de suelo) 3. Arcillas de muy alta plasticidad ( $H \geq 7.62m$ e índice de plasticidad $PI \geq 75$ ) 4. Arcillas potentes de media/baja rigidez ( $H \geq 36.576m$ )		

1 pie = 0.3048m = 304.8mm — 1 pie cuadrado = 0.0929mm<sup>2</sup> — 1 libra por pie cuadrado = 0.0479kPa

Figura 26: Classificació del terreny en funció de la velocitat s

Segons la tabla anterior, per a classificar-se el terreny com a roca, la velocitat de les ones s, ha de ser com a mínim 365.7 m/s.

En el cas present tots els assajos realitzat superen aquest valor. Cal remarcar que hi ha alguns valors pròxims a aquest mínim. El motiu es que el substrats rocosos poden tindre petites làmines d'argila i que l'assaig s'haja produït en elles.

A continuació, recopilada tota la informació, s'ha ordenat en funció del sondeig i la formació on es troba el paràmetre.

Font: Elaboració pròpia

	IV-III		II		IB		I	
	Gdin (Mpa)	Profunditat (m)	Gdin (Mpa)	Profunditat (m)	Gdin (Mpa)	Profunditat (m)	Gdin (Mpa)	Profunditat (m)
Sondeig 1	489	0,85	565	2,8	748	5,35	-	-
	-	-	-	-	507	8,5	-	-
	-	-	-	-	449	12,1	-	-
Sondeig 2	-	-	92	1,2	1852	5,35	1901	12,1
	-	-	1465	3,9	1823	8,5	-	-
Sondeig 3	-	-	1391	1,2	1386	3,95	1553	6,9
	-	-	-	-	-	-	1449	11,15
Sondeig 5	770	1,75	-	-	-	-	1155	10,05
	777	5,2	-	-	-	-	1049	13,6
Sondeig 6	350	2,25	-	-	409	5,45	405	9,7
	-	-	-	-	391	7,5	2004	12,35

Figura 27: Anàlisi dades assaig de sísmica passiva en funció de la formació i sondeig

Finalment, s'ha obtingut el paràmetre Gdinàmic de cada formació amb l'ajuda de diversos mètodes estadístics, com és el diagrama de *box-whiskers*. per a ratificar que els paràmetres són d'un mateix ordre de magnitud.

Cal destacar que no es disposen d'una quantitat elevada de paràmetres per tant un valor mitjà basat en la mitja no és representatiu ja que no es tracta d'una distribució de Gauss (normal) i, per tant, un valor molt elevat o molt menut pot incrementar o disminuir notablement el valor que ens interessa. D'aquesta manera, quan es disposen de poques dades es recomanable la utilització de mètodes com el diagrama de *box-whiskers* ja que no exigeix un elevat nombre de dades per a la seua construcció. Tots aquells valors que siguen una vegada i mitja superior o inferior del interval interquartilic seran considerats *outliers*.

Font: Elaboració pròpia

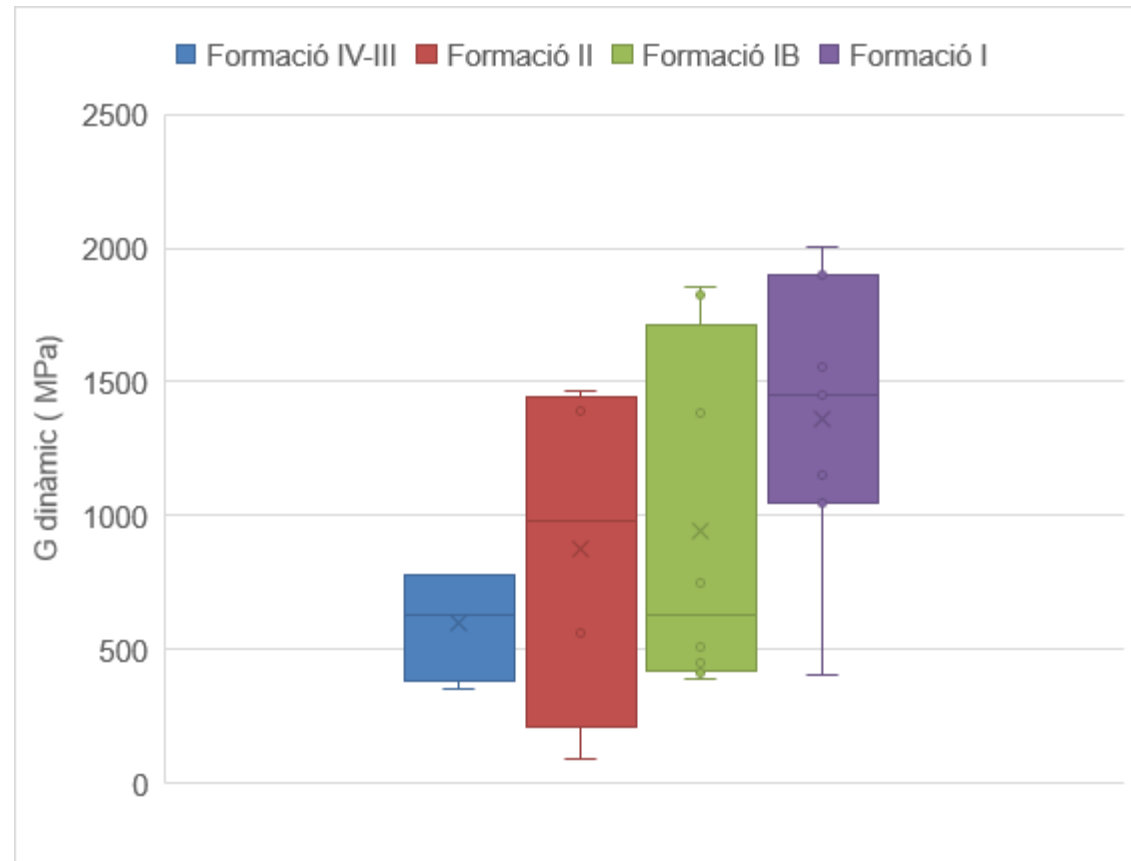


Figura 28: Representació gràfica del diagrama de Box-Whiskers de cada formació

Com podem observar a la representació gràfica superior, cap dels valor de Gdinàmic es tracta d'un valor atípic, per tant, es poden considerar totes les dades que em estat analitzat sense tractar ninguna com a *outlier*.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Gdin (MPa)	597,01	878,74	946,15	1.360,01
	597	879	946	1.360

Figura 29: Gdin (assaig sísmica passiva) en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

Finalment, s'ha obtingut un valor mitjà del Gdinàmic per a cada formació.

## 9.6 Assajos dilatòmètrics (mòdul de deformació)

El mòdul de deformació per a cada estrat estudiat s'obté mitjançant l'assaig dilatomètric. A la següent tabla es pot observar el paràmetre relacionant a cada formació.

Font: Elaboració pròpia.

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
E' (MPa)	120	120	350	350

Figura 30: Mòdul de deformació de cada estrat



## 10 Investigació al laboratori

Els assajos de laboratori tenen diverses finalitats com ara bé la caracterització dels materials mitjançant diferents procediments. Aquestes investigacions es realitzen a partir de les mostres que s'han obtingut a camp, com per exemple els sondejos, els sondatges...

A continuació, es van a analitzar les dades obtingudes al laboratori dels següents assajos: resistència a compressió uniaxial on s'han realitzat un total de 26 proves, la determinació de la densitat i contingut de sulfats.

### 10.1 Resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca

Aquest assaig es basa en la col·locació d'una proveta cilíndrica en una premsa. Seguidament, es trenca a compressió sense cap confinament lateral. Es tracta d'una assaig directe per a aconseguir la compressió simple.

A continuació, es descriu el procediment seguit per a recopilar totes les dades. A més a més, es mostren diverses tables amb la recopilació de totes les dades de compressió simple obtingudes a partir d'aquest assaig.

El procediment seguit és el descrit a continuació. En primer lloc, s'han recopilat totes les dades de partida ordenades en una tabla indicant el sondeig, la profunditat, la descripció dels material, la formació i la compressió simple tant en kg/cm<sup>2</sup> com en kPa.

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	Compressió simple Qu (kg/cm <sup>2</sup> )	Compressió simple Qu (kPa)
1	3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	5	500
1	5,4	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	5,3	530
1	6,6	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	15,4	1.540
1	11,3	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	2	200
1	16,5	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	203,8	20.380
2	3,6	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	4,9	490
2	5,6	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	85,5	8.550
2	6,2	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	101,7	10.170
2	7	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	4,5	450
2	12,9	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	77,7	7.770
2	13,8	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	22,6	2.260

Sondeig	Profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	Compressió simple Qu (kg/cm <sup>2</sup> )	Compressió simple Qu (kPa)
3	5,1	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	70	7.000
3	6,3	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	42	4.200
3	6,8	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	37,9	3.790
3	7,3	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	33,5	3.350
3	8,6	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	93,5	9.350
3	13,8	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	93,5	9.350
5	10,4	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	70,8	7.080
5	11	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	122,4	12.240
5	11,4	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	70,8	7.080
5	12	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	64,9	6.490
5	12,6	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	58,1	5.810
6	8,6	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	80	8.000
6	10,8	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	85,5	8.550
6	13,85	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	73,2	7.320
6	16,9	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	83,4	8.340

Figura 31: Recopilació dades de l'assaig de resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca

Seguidament, s'han ordenat les dades en funció del sondeig i de la formació on s'han obtingut. És a dir, cada sondeig s'ha dividit en les diferents formacions que té i en cada formació s'ha introduït les dades de compressió simple que es disposen per a cada formació. Una vegada ordenades totes les dades, s'ha resumit tota la informació en un tabla comuna per a analitzar de quines es disposen i a quin sondeig corresponen.

Font: Elaboració pròpia

	IV-III		II		IB		I	
	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)	Compressió simple (kPa)	Profunditat (m)
Sondeig 1	-	-	500	3	530	5,4	-	-
	-	-	-	-	1.540	6,6	-	-
	-	-	-	-	200	11,3	-	-
	-	-	-	-	20.380	16,5	-	-
Sondeig 2	-	-	490	3,6	8.550	5,6	7.770	12,9
	-	-	-	-	10.170	6,2	2.260	13,8
	-	-	-	-	450	7	-	-
Sondeig 3	-	-	-	-	-	-	7.000	5,1
	-	-	-	-	-	-	4.200	6,3
	-	-	-	-	-	-	3.790	6,8
	-	-	-	-	-	-	3.350	7,3
	-	-	-	-	-	-	9.350	8,6
	-	-	-	-	-	-	9.350	13,8
Sondeig 5	-	-	-	-	-	-	7.080	10,4
	-	-	-	-	-	-	12.240	11
	-	-	-	-	-	-	7.080	11,4
	-	-	-	-	-	-	6.490	12
	-	-	-	-	-	-	5.810	12,6
Sondeig 6	-	-	-	-	-	-	8.000	8,6
	-	-	-	-	-	-	8.550	10,8
	-	-	-	-	-	-	7.320	13,85
	-	-	-	-	-	-	8.340	16,9

Figura 32: Anàlisi de les dades de l'assaig de resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca en funció de la formació i sondeig

Es disposa d'una quantitat bastant elevada d'assajos uniaxial per a l'obtenció de la compressió simple. D'aquesta manera, es va a analitzar aquests assajos sense tindre en compte els resultats obtinguts mitjançant el PLT.

Com es pot observar a la tabla resum, la majoria d'assajos de compressió simple que s'han aconseguit, fan referència a la formació I. A més a més, els valors estan dintre d'un mateix ordre de magnitud. Tanmateix, de la formació II i IB sols es tenen dades dels sondejos 1 i 2. Per altra banda, respecte la formació IB, hi ha valors que no pertanyen al mateix ordre de magnitud. Respecte a la formació II, sols tenim un valor per cada sondeig (sondeig 1 i 2). Per un altra banda, de la formació III-IV no disposem de cap assaig.

L'assaig uniaxial és un assaig directe per a l'obtenció de la compressió simple, tanmateix per escasses nombre de dades en algunes formacions, analitzarem també l'assaig PLT. És important destacar que per a la utilització de les dades de l'assaig de càrrega puntual, s'ha estudiat que l'ordre de magnitud fora el mateix, i, per tant, si les dades podien ser comparables, ja que al tractar-se de fragments molt petits, pot ser el resultat obtingut no fora equivalent al total de macís. Per a analitzar aquestes dades, s'ha utilitzat el mètode estadístic anteriorment explicat del diagrama *box-whiskers*.

El procediment que s'ha seguit per al tractament de les dades d'ambos assajos és el descrit a continuació. S'ha realitzat per a cada formació un diagrama de *box-whiskers* amb totes les dades tant de l'assaig PLT com les de l'assaig uniaxial. Les dades d'ambos assajos de les formacions IV-III, II i IB són del mateix ordre de magnitud. Tanmateix, la unificació de les dades de la formació I es pot apreciar la presència de dades atípiques com es mostra en el següent gràfic.

Font: Elaboració pròpia

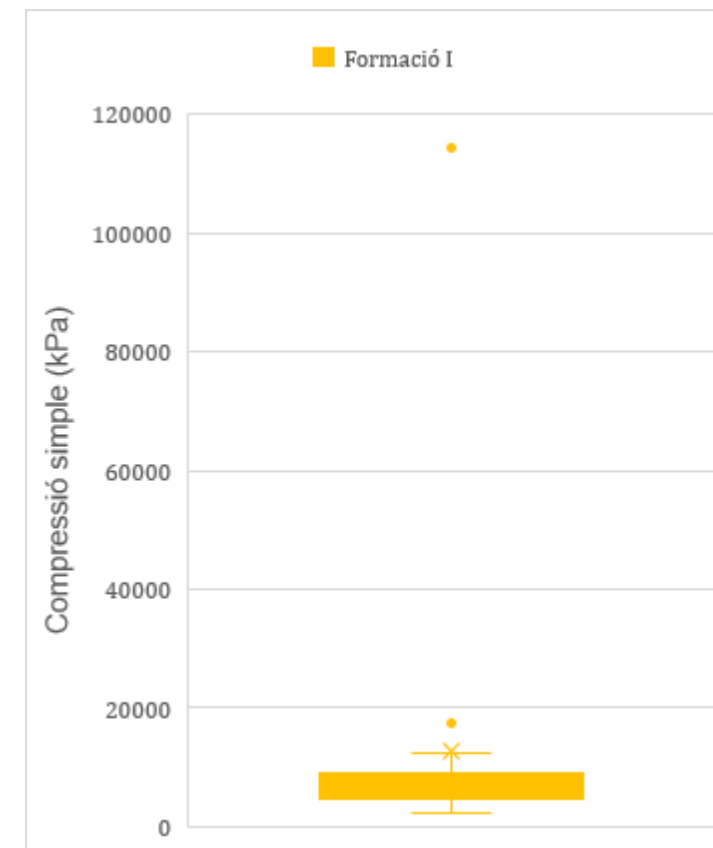


Figura 33: Representació de la compressió simple de la formació I tant de l'assaig uniaxial com del PLT mitjançant el diagrama box-whiskers

Com es pot observar al diagrama superior, a la formació I hi ha dos valors que es poden considerar *outliers* i per tant s'han eliminat. Aquests valors pertanyen a l'assaig PLT, i com s'ha explicat anteriorment, el valor tant elevat pot ser conseqüència de que aquest assaig es realitza en un fragment molt petit i no es representatiu del macís total. Per tant, com s'ha indicat, s'eliminen eixes dos dades i la representació de la compressió simple d'ambos assajos per a cada formació mitjançant el diagrama de box-whiskers queda de la següent manera:

Font: Elaboració pròpia

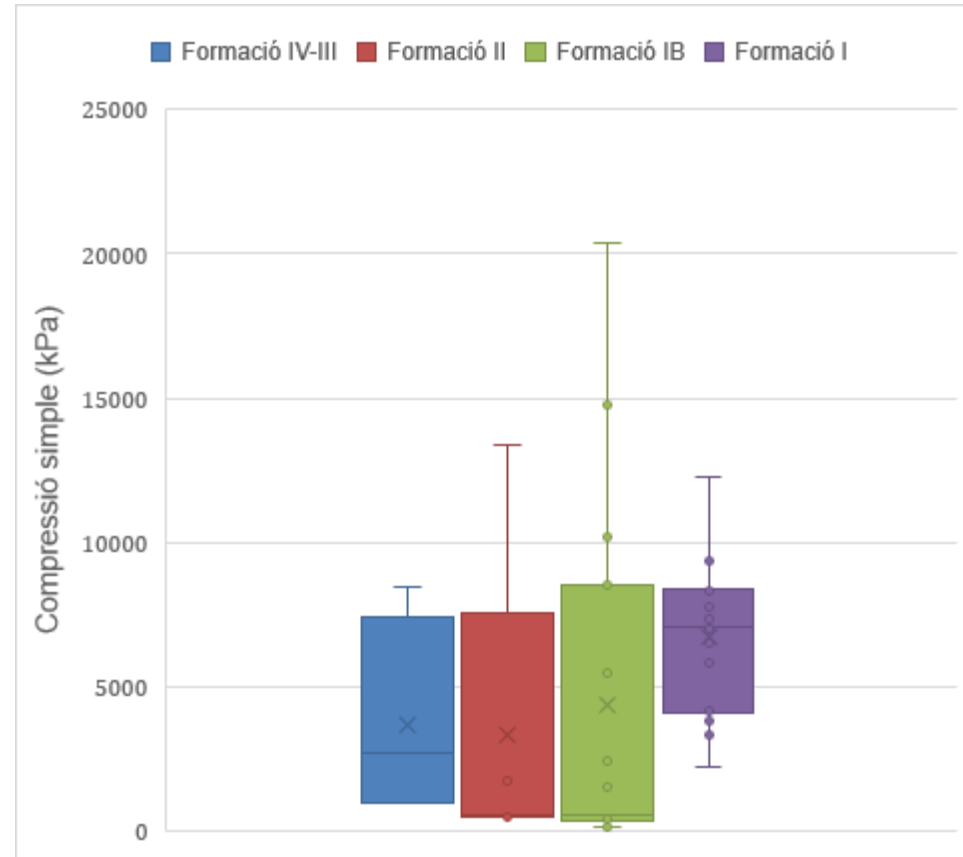


Figura 34: Gràfic box-whiskers de la resistència a la compressió simple

D'aquesta manera amb les dades eliminades ja no hi ha dades atípiques de compressió simple i en la següent taula es pot observar el valor final de compressió simple de cada formació tenint en compte tant l'assaig uniaxial com el PLT.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Compressió simple (kPa)	3.703,8	3.333,2	4.408,8	6.740,1
	3.000	3.333	4.408	6.740
	3.000	3.333	4.409	6.740

Figura 35: Resistència a la compressió simple en funció de la formació

S'observa que el valor obtingut en la formació IV-III és lleugerament major al de la formació II. Probablement aquest fet siga conseqüència de la unificació del tractament de dades. Per tant, s'ha decidit variar el valor de la compressió simple de la formació IV-III per a que siga més lògic.

## 10.2 Densitat aparent. Determinació de la densitat i assaig de compressió simple

Per a la determinació de la densitat del terreny s'analitzen les dades de 2 assajos de partida dels quals es disposen.

Respecte l'assaig de laboratori anomenat "Determinació de la densitat", es tracta d'un assaig específic per a la determinació de la densitat aparent. S'utilitzarà l'anomenada densitat humida ja que es tracta de la que té el terreny en la seua localització. Tot i que es coneix com a densitat humida, cal remarca que no es tracta d'una densitat per baix del nivell freàtic o que els seus porus estiguen saturats. El terme humit sols fa referència a que el terreny té una part de humitat.

Per un altra banda, també s'ha decidit analitzar la densitat de la proveta que s'utilitza en la realització de l'assaig uniaxial.

El procediment que s'ha utilitzat per al tractament tant de les dades de l'assaig "determinació de la densitat" com "l'assaig uniaxial" és molt semblant a l'exposat anteriorment per aconseguir la resistència a compressió simple.

En primer lloc, s'ha recopilat en dues taules separades, una per a cada assaig, tota la informació de partida.

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Cota mostra (m)	Descripció dels materials	Formació	Densitat aparent (gr/cm3)	Densitat aparent (KN/m3)
1	1,8	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps	IV-III	2,09	20,9
1	2,4	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps	IV-III	2,18	21,8
1	9,8	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	2,2	22
2	2	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	1,95	19,5



Sondeig	Cota mostra (m)	Descripció dels materials	Formació	Densitat aparent (gr/cm3)	Densitat aparent (KN/m3)
2	2,7	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	2,24	22,4
2	3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	1,81	18,1
2	3,6	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	2,21	22,1
2	5,6	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	2,32	23,2
2	6,2	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	2,33	23,3
3	0,4	Argiles llimoses amb cantells d'algeps		2,09	20,9
3	0,8	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenas, nòduls d'algeps	IV-III	1,8	18
3	3,2	Substrat rocós alterat grau IB. Tram que ha perdut la seua consistència	IB	1,91	19,1
3	5,2	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	2,35	23,5
3	6,4	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	2,31	23,1
3	13,8	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	2,31	23,1

Figura 36: Recopilació dades assaig determinació de la densitat

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Cota mostra (m)	Descripció dels materials	Formació	Densitat aparent (gr/cm3)	Densitat aparent (KN/m3)
1	5,4	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	2,15	21,5
1	6,6	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	2,24	22,4
1	11,3	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	2,14	21,4
1	16,5	Substrat rocós alterat grau IB amb molta fracturació. Margues amb algeps	IB	2,12	21,2
2	3,6	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	2,23	22,3
2	5,6	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	2,28	22,8
2	6,2	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	2,34	23,4
2	7	Substrat rocós alterat grau IB. Margues amb algeps, amb nòduls de roca d'algeps	IB	2,15	21,5
2	12,9	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	2,32	23,2

Sondeig	Cota mostra (m)	Descripció dels materials	Formació	Densitat aparent (gr/cm3)	Densitat aparent (KN/m3)
2	13,8	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	2,3	23
5	10,6	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	2,29	22,9
5	11,2	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	2,29	22,9
5	11,5	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	2,3	23
5	12,2	Substrat rocós sa format per algeps laminats	I	2,31	23,1
6	8,6	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	2,29	22,9
6	10,8	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	2,27	22,7
6	13,9	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	2,32	23,2
6	17,1	Substrat rocós sa. Margues amb algeps laminats	I	2,31	23,1

Figura 37: Recopilació dades assaig resistència a compressió uniaxial de provetes cilíndriques de roca

Seguidament, també en una tabla per a cada assaig, s'ha organitzat els paràmetres en funció del sondeig i de la formació que procedeixen.

Font: Elaboració pròpia

	IV-III		II		IB		I	
	Densitat aparent (kN/m3)	Profunditat (m)	Densitat aparent (kN/m3)	Profunditat (m)	Densitat aparent (kN/m3)	Profunditat (m)	Densitat aparent (kN/m3)	Profunditat (m)
Sondeig 1	20,9	1,8	-	-	22	9,8	-	-
	21,8	2,4	-	-	-	-	-	-
Sondeig 2	-	-	19,5	2	23,2	5,6	-	-
	-	-	22,4	3	23,3	6,2	-	-
	-	-	18,1	3	-	-	-	-
	-	-	22,1	4	-	-	-	-
Sondeig 3	18	0,8	-	-	19,1	3,2	23,5	5,2
	-	-	-	-	-	-	23,1	6,4
	-	-	-	-	-	-	23,1	13,8

Figura 38: Anàlisi dades assaig determinació de la densitat en funció de la formació i sondeig

Font: Elaboració pròpia

	IV-III		II		IB		I	
	Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	Profunditat (m)	Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	Profunditat (m)	Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	Profunditat (m)	Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	Profunditat (m)
Sondeig 1	-	-	-	-	21,5	5,4	-	-
	-	-	-	-	22,4	6,6	-	-
	-	-	-	-	21,4	11,3	-	-
	-	-	-	-	21,2	16,5	-	-
Sondeig 2	-	-	22,3	4	22,8	5,6	23,2	12,9
	-	-	-	-	23,4	6,2	23	13,8
	-	-	-	-	21,5	7	-	-
Sondeig 5	-	-	-	-	-	-	22,9	10,6
	-	-	-	-	-	-	22,9	11,2
	-	-	-	-	-	-	23	11,5
	-	-	-	-	-	-	23,1	12,2
Sondeig 6	-	-	-	-	-	-	22,9	8,6
	-	-	-	-	-	-	22,7	10,8
	-	-	-	-	-	-	23,2	13,9
	-	-	-	-	-	-	23,1	17,1

Figura 39: Anàlisi dades assaig resistència a compressió uniaxial en funció de la formació i sondeig

Una vegada obtinguda aquesta tabla per a cada assaig, s'han comparat les dades d'ambos assajos i s'ha comprovat que tant les dades obtingudes en l'assaig de determinació de la densitat com les obtingudes mitjançant l'assaig de compressió simple estan dintre del mateix ordre de magnitud. D'aquesta manera, es poden homogeneïtzar les dades i realitza la mitjana tenint en compte cada formació.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	20,23	20,88	21,98	23,05
	20	21	22	23

Figura 40: Densitat aparent en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

### 10.3 Contingut de sulfats

Les propietats geomecàniques que van a utilitzar-se són les de les roques. Cal destacar que hi ha moltes roques sensibles i degradables amb l'aigua, com ara les margues i els algeps. També cal remarcar, la importància del formigó que s'utilitza en funció dels sulfats. Mitjançant les mostres obtingudes dels sondatges, es pot determinar la agressivitat del terreny en funció dels sulfats que pugen existir i, afectar a les cimentacions.

S'ha seguit el mateix procediment per al tractament de dades que per als paràmetres exposats anteriorment. S'ha estudiant l'assaig de Contingut de sulfats solubles en sòl, i s'ha determinat per cada formació el tipus d'exposició segons la EHE.

A la següent tabla es pot observar de manera ordenada, tenint en compte el sondeig i la formació, el contingut en ió sulfat segons la norma UNE 83963:2008. L'objectiu principal d'aquest anàlisi es aconseguir el grau d'atac del formigó per part del terreny.

Font: Elaboració pròpia

Sondeig	Profunditat (m)		Mitja profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	SO <sub>4</sub> - (mg/kg de sòl sec)
	De	A				
1	-	-	1,8	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps	IV-III	13.986,77
1	-	-	2,4	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps	IV-III	6.368,74
1	2,4	3	2,7	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	34.95,13
1	-	-	3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	3.368
2	-	-	2	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	5.983,66
2	-	-	2,7	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	9.491,35
2	-	-	3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	7.329,05

Sondeig	Profunditat (m)		Mitja profunditat (m)	Descripció dels materials	Formació	SO4- (mg/kg de sòl sec)
	De	A				
2	-	-	3,3	Substrat rocós alterat grau II, margues argiloses, amb nòduls de roca d'algeps	II	6.119,79
3	0,3	0,5	0,4	Argiles llimoses	-	1.543,49
3	2,4	2,7	2,55	Substrat rocós alterat grau IB. Tram que ha perdut la seua consistència	IB	6.860,62
3	3	3,4	3,2	Substrat rocós alterat grau IB. Tram que ha perdut la seua consistència	IB	12.136
3	3,8	4	3,9	Substrat rocós alterat grau IB. Tram que ha perdut la seua consistència	IB	14.339,74
3	5,1	5,4	5,25	Substrat rocós format per algeps laminats amb margues. Tram amb fractures obertes	I	9.378,78
				Mitjana		7.723,16

Figura 41: Recopilació dades assaig contingut de sulfats solubles

Seguidament, s'ha elaborat un quadre resum amb les dades del ió sulfat en funció de les 4 formacions diferents que s'han trobat: formació IV-III, II, IB i I.

Font: Elaboració pròpia

	SO4- (mg/kg de sòl sec) per formacions			
	IV-III	II	IB	I
	13.986,77	3.495,13	6.860,62	9.378,78
	6.368,74	3.368	12.136	-
	-	5.983,66	14.339,74	-
	-	9.491,35	-	-
	-	7.329,05	-	-
	-	6.119,79	-	-
Mitjana	10.177,75	5.964,49	11.12,12	9.378,78

Figura 42: Anàlisi dades assaig contingut de sulfats solubles en funció de la formació i sondeig

A continuació, es mostren els límits de contingut del ió sulfats establerts per la EHE.

Font: EHE-08. Instrucció de formigó estructural

TIPO DE MEDIO AGRESIVO	PARÁMETROS	TIPO DE EXPOSICIÓN		
		Qa	Qb	Qc
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
AGUA	VALOR DEL pH, según UNE 83.952	6,5-5,5	5,5-4,5	< 4,5
	CO <sub>2</sub> AGRESIVO (mg CO <sub>2</sub> /l), según UNE-EN 13.577	15-40	40-100	> 100
	IÓN AMONIO (mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /l), según UNE 83.954	15-30	30-60	> 60
	IÓN MAGNESIO (mg Mg <sup>2+</sup> /l), según UNE 83.955	300-1.000	1.000-3.000	> 3.000
	IÓN SULFATO (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /l), según UNE 83.956	200-600	600-3.000	> 3.000
	RESIDUO SECO (mg/l), según UNE 83.957	75-150	50-75	< 50
SUELO	GRADO DE ACIDEZ BAUMANN-GULLY (ml/kg), según UNE 83.962	> 200	(*)	(*)
	IÓN SULFATO (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg de suelo seco), según UNE 83.963	2.000-3.000	3.000-12.000	> 12.000

Figura 43: Classificació de l'agressivitat química

Tenint en compte els límits establerts per la EHE per a considerar l'agressivitat del terreny, l'atac seria mitjà.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
SO4- (mg/kg de sòl sec)	10.177,75	5.964,49	11.112,12	9.378,78
	10.178	5.964	11.112	9.379
Tipus d'exposició	Qb	Qb	Qb	Qb

Figura 44: Contingut de sulfats en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

## 11 Paràmetres obtinguts mitjançant correlacions amb assajos: angle de fregament i cohesió

Es disposen d'assajos de partida en els qual s'informa tant del paràmetre de l'angle de fregament com el de cohesió. Tanmateix, aquests, no són representatius dels macís rocós ja que s'han obtingut en les capes diminutes de sòl o en capes molts fracturades les quals es poden considerar sòl que hi ha disposades entre el macís rocós. El terreny que s'estudia en aquest document és majoritàriament macís rocós, per aquest motiu utilitzar els paràmetres representatius del sòl seria realitzar un anàlisi massa conservador i per tant les cimentacions es sobredimensionarien. El macís rocós és molt més competent que els paràmetres obtinguts per a un sòl.

L'obtenció de l'angle de fregament i cohesió equivalent per a roca es realitza mitjançant el programa *RocLab*. Cal destacar, que els paràmetres utilitzats són inferiors als obtinguts mitjançant aquest programa per a estar del lloc de la seguretat.

El model de trencament que segueix una roca es el de Hoek-Brown, tanmateix per a poder realitzar el càlcul es necessari aconseguir uns paràmetres equivalents de cohesió i angle de fregament del model de Mohr-Coulomb. Per a poder realitzar aquesta equivalència, s'empra el programa *Roclab*. Introduint una sèrie de paràmetres al programa, es poden aconseguir l'angle de fregament i la cohesió.

Els principals paràmetres necessaris que cal introduir al programa de càlcul *RocLab* són el mòdul de compressió simple i el RMR.

Respecte al primer d'ells, la resistència a compressió simple, s'explica com s'ha obtingut a aquest document. A continuació es mostra una tabla resum amb el paràmetre característic de cada formació.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Compressió simple (kPa)	3.000	3.333	4.409	6.740

Figura 45: Resistència a la compressió simple en funció de la formació

Seguidament, s'explica el procediment seguit per a l'obtenció del paràmetre RMR necessari per a introduir al programa *RocLab* i així poder aconseguir l'angle de fregament i cohesió del terreny objecte d'estudi.

La classificació dels massissos rocósos és l'obtenció de paràmetres geomecànics per a l'ús en el disseny i projecte d'enginyeria civil. El procediment consisteix en aconseguir un índex de qualitat per així relacionar-lo amb paràmetres geotècnics.

La classificació que s'ha utilitzat a aquest document és la proposada per Bieniawski en 1973 la qual ha sigut actualitzada diverses vegades al llarg del temps. La seua classificació té present diferents paràmetres:

- Resistència uniaxial de la matriu rocosa
- Grau de fracturació. RQD
- Espaiat de les discontinuïtats
- Condicions de les discontinuïtats

- Condicions hidrogeològiques

En funció de la incidència d'aquests paràmetres en el macís rocós s'obindrà l'índex de qualitat RMR ("rock mass rating"). El seu valor varia entre 0 i 100 (corresponent 0 a molt mala qualitat i 100 a molt bona qualitat). El principal avantatge d'aquesta classificació geomecànica són les baixes despeses de la seua realització i a més, es tracta d'un procediment senzill. Per al seu càlcul es segueix el procediment exposat al següent quadre.

Font: Enginyeria geològica. González de Vallejo, Luís Ortuño.

Tabla 3.3: Parámetros y rango de valores para la clasificación geomecánica RMR<sub>90</sub>

Parámetro		Rango de valores								
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo puntual carga	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa				
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MP	< 1 MPa	
		valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	valor		20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm			
	valor		20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
		Valor	6	4	2	1	0			
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
		Valor	6	5	3	1	0			
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			
		Valor	6	5	3	1	0			
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm			
		Valor	6	4	2	2	0			
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			
valor		6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5			
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo			
		valor		15	10	7	4	0		

Figura 46: Paràmetres per a la classificació geomecànica RMR

Cal realitzar un incís respecte el quint aspecte tracta a l'anterior tabla referit al flux de l'aigua. S'ha considerat que quan el nivell freàtic es troba per davall del macís estudiat, s'utilitzarà la condició general referent a "lleugerament humit" ja que el terreny sempre disposa de certa humitat. Per altra banda, quan el nivell de l'aigua es localitza per damunt del punt d'estudi, no cal penalitzar amb una puntuació "aigua fluint" ja que eixes condicions generals són per a casos on les fractures estan molt obertes. D'aquesta manera, s'utilitza la condició general "humit" o "gotejant".

A continuació, es mostra cada valor de cada paràmetre per a cada sondeig.

Font: Elaboració pròpia

Profunditat (m)		Sondeig 1														
De (m)	A (m)	Perfil geològic	Compressió simple (kPa)	Compressió simple (MPa)	Valor Compressió simple	RQD %	Valor RQD %	Valor Espai de les discontinuïtats	Valor Longitud discontinuïtats	Valor obertura	Valor rugositat	Valor Farcit	Valor Alteració	Posició nivell freàtic (m)	Valor Flux d'aigua en les juntes	RMR
0	0,5	Terra vegetal														
0,5	1	Argila llimosa														
1	1,5	Substrat rocós alterat grau IV-III	3,000	3	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del NF	10	27
1,5	2															
2	2,5															
2,5	3	Substrat rocós alterat grau II	3,333	3.333	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del NF	10	27
3	3,5	Substrat rocós alterat grau IB	4,409	4.4	1	60%	13	8	2	1	1	1	1	A partir de 14,3	7	35
3,5	4															
4	4,5															
4,5	5															
5	5,5															
5,5	6															
6	6,5															
6,5	7															
7	7,5															
7,5	8															
8	8,5															
8,5	9															
9	9,5															
9,5	10															
10	10,5															
10,5	11															
11	11,5															
11,5	12															
12	12,5															
12,5	13															
13	13,5															
13,5	14															
14	14,5															
14,5	15															
15	15,5															
15,5	16															
16	16,5															
16,5	17															
17	17,5	Substrat rocós sa	6,740	6.74	2	80	17	8	2	3	3	2	3	Per davall del NF	4	44
17,5	18															
18	18,5															
18,5	19															
19	19,5															
19,5	20															
20	20,5															
20,5	21															
21	21,5															
21,5	22															
22	22,5															
22,5	23															
23	23,5															
23,5	24															
24	24,5															
24,5	25															
25	25,5															

Figura 47: RMR. Sondeig 1

Font: Elaboració pròpia

Profunditat (m)		Sondeig 2														
De	A	Perfil geològic	Compressió simple (kPa)	Compressió simple (MPa)	Valor Compressió simple	RQD %	Valor RQD %	Valor Espai de les discontinuïtats	Valor Longitud de les discontinuïtats	Valor obertura	Valor rugositat	Valor Farcit	Valor Alteració	Posició nivell freàtic (m)	Valor Flux d'aigua en les juntes	RMR
0	0,5	Terra vegetal														
0,5	1	Substrat rocós alterat grau II	3,333	3.3	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del nivell freàtic	10	27
1	1,5															
1,5	2															
2	2,5															
2,5	3															
3	3,5	Substrat rocós alterat grau IB	4,409	4.409	1	60	13	8	2	1	1	1	1	Per damunt del nivell freàtic	10	38
3,5	4															
4	4,5															
4,5	5															
5	5,5															
5,5	6															
6	6,5															
6,5	7															
7	7,5	Substrat rocós sa	6,740	6.7	2	80	17	8	2	3	3	2	3	A partir de 13,1	4	44
7,5	8															
8	8,5															
8,5	9															
9	9,5															
9,5	10															
10	10,5															
10,5	11															
11	11,5															
11,5	12															
12	12,5															
12,5	13															
13	13,5															
13,5	14															
14	14,5															
14,5	15															
15	15,5															
15,5	16															
16	16,5															
16,5	17															
17	17,5															
17,5	18															
18	18,5															
18,5	19															
19	19,5															
19,5	20															
20	20,5															
20,5	21															
21	21,5															
21,5	22															
22	22,5															
22,5	23															
23	23,5															
23,5	24															
24	24,5															
24,5	25															
25	25,5															

Figura 48: RMR. Sondeig 2



Font: Elaboració pròpia

Profunditat (m)		Sondeig 3														
De	A	Pergil geològic	Compressió simple (kPa)	Compressió simple (MPa)	Valor Compressió simple	RQD %	Valor RQD %	Valor Espai de les discontinuïtats	Valor Longitud de les discontinuïtats	Valor obertura	Valor rugositat	Valor Farcit	Valor Alteració	Posició nivell freàtic (m)	Valor Flux d'aigua en les juntes	RMR
0	0,5	Terra vegetal														
0,5	1	Argiles llimoses														
1	1,5	Substrat rocós alterat grau IV-III	3,000	3.00	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del NF	10	27
1,5	2	Substrat rocós alterat grau II	3,333	3.33	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del NF	10	27
2	2,5															
2,5	3	Substrat rocós alterat grau IB	4,409	4.41	1	60	13	8	2	1	1	1	1	Per damunt del NF	10	38
3	3,5															
3,5	4															
4	4,5															
4,5	5	Substrat rocós sa	6,740	6.74	2	80	17	8	2	3	3	2	3	A partir de 15,9	4	44
5	5,5															
5,5	6															
6	6,5															
6,5	7															
7	7,5															
7,5	8															
8	8,5															
8,5	9															
9	9,5															
9,5	10															
10	10,5															
10,5	11															
11	11,5															
11,5	12															
12	12,5															
12,5	13															
13	13,5															
13,5	14															
14	14,5															
14,5	15															
15	15,5															
15,5	16															
16	16,5															
16,5	17															
17	17,5															
17,5	18															
18	18,5															
18,5	19															
19	19,5															
19,5	20															
20	20,5															
20,5	21															
21	21,5															
21,5	22															
22	22,5															
22,5	23															
23	23,5															
23,5	24															
24	24,5															
24,5	25															
25	25,5															

Figura 49: RMR. Sondeig 3

Font: Elaboració pròpia

Profunditat (m)		Sondeig 5														
De	A	Perfil geològic	Compressió simple (kPa)	Compressió simple (MPa)	Valor Compressió simple	RQD %	Valor RQD %	Valor Espai de les discontinuïtats	Valor Longitud de les discontinuïtats	Valor obertura	Valor rugositat	Valor Farcit	Valor Alteració	Posició nivell freàtic (m)	Valor Flux d'aigua en les juntes	RMR
0	0.5	Limós amb nòduls de roca d'algeps														
0.5	1	Substrat rocós alterat grau IV-III	3,000	3.00	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del nivell freàtic	10	27
1	1.5															
1.5	2															
2	2.5															
2.5	3															
3	3.5															
3.5	4															
4	4.5															
4.5	5															
5	5.5															
5.5	6	Substrat rocós alterat grau II	3,333	3.333	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Pe damunt del nivell freàtic	10	27
6	6.5															
6.5	7															
7	7.5															
7.5	8	Substrat rocós sa	6,740	6.74	2	80	17	8	2	3	3	2	3	No s'obté aigua. Nivell 20,2	10	50
8	8.5															
8.5	9															
9	9.5															
9.5	10															
10	10.5															
10.5	11															
11	11.5															
11.5	12															
12	12.5															
12.5	13															
13	13.5															
13.5	14															
14	14.5															
14.5	15															
15	15.5															
15.5	16															
16	16.5															
16.5	17															
17	17.5															
17.5	18															
18	18.5															
18.5	19															
19	19.5															
19.5	20															
20	20.5															
20.5	21															
21	21.5															
21.5	22															
22	22.5															
22.5	23															
23	23.5															
23.5	24															
24	24.5															
24.5	25															
25	25.5															

Figura 50: RMR. Sondeig 5



Font: Elaboració pròpia

Profunditat (m)		Sondeig 6														
De	A	Perfil geològic	Compressió simple (kPa)	Compressió simple (MPa)	Valor Compressió simple	RQD %	Valor RQD %	Valor Espai de les discontinuïtats	Valor Longitud de les discontinuïtats	Valor obertura	Valor rugositat	Valor Farcit	Valor Alteració	Posició nivell freàtic (m)	Valor Flux d'aigua en les juntes	RMR
0	0.5	Terra vegetal														
0.5	1	Llims argilosos amb nòduls de roca d'algeps														
1	1.5	Substrat rocós alterat grau IV-III	3,000	3.00	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del N.F.	10	27
1.5	2															
2	2.5															
2.5	3															
3	3.5															
3.5	4	Substrat rocós alterat grau II	3,333	3.333	1	45	8	3	1	1	1	1	1	Per damunt del N.F.	10	27
4	4.5															
4.5	5															
5	5.5	Substrat rocós IB	4,409	4.41	1	60	13	8	2	1	1	1	1	Per damunt del N.F.	10	38
5.5	6															
6	6.5															
6.5	7															
7	7.5	Substrat rocós sa	6,740	6.74	2	80	17	8	2	3	3	2	3	A partir de 15,2	4	44
7.5	8															
8	8.5															
8.5	9															
9	9.5															
9.5	10															
10	10.5															
10.5	11															
11	11.5															
11.5	12															
12	12.5															
12.5	13															
13	13.5															
13.5	14															
14	14.5															
14.5	15															
15	15.5															
15.5	16															
16	16.5															
16.5	17															
17	17.5															
17.5	18															
18	18.5															
18.5	19															
19	19.5															
19.5	20															
20	20.5															
20.5	21															
21	21.5															
21.5	22															
22	22.5															
22.5	23															
23	23.5															
23.5	24															
24	24.5															
24.5	25															
25	25.5															

Figura 51: RMR. Sondeig 6

De forma aclaridora, es mostra una tabla resum amb els paràmetres RMR introduïts al *RocLab*.

Font: Elaboració pròpia

RMR							
Formació	Sondeig 1	Sondeig 2	Sondeig 3	Sondeig 5	Sondeig 6	Mitjana	Arrodonir
IV-III	27		27	27	27	27	27
II	27	27	27	27	27	27	27
IB	35	38	38		38	37.25	37
I	44	44	44	50	44	45.2	45

Figura 52: RMR per a cada formació

Aquest dos paràmetres, la compressió simple i RMR, junt a altres paràmetres definits al programa com "mi" (referit al tipus de roca: algeps i marga), "D" (en funció del tipus de excavació...) s'introdueixen al programa RocLab per a aconseguir els paràmetres de cohesió i angle de fregaments segons el criteri de Mohr-Coulomb. A la següent tabla, queden definits els paràmetres representatius finalment obtinguts.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Angle de fregament (°)	24	29	34	45

Figura 53: Angle de fregament en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Cohesió (MPa)	16	18	30	43

Figura 54: Cohesió en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

## 12 Paràmetres per al disseny de les cimentacions

El present Annex geotècnic ha tingut com a objectiu principal la valoració de les característiques geotècniques dels diferents materials ubicats en els 5 aerogeneradors, tant des del punt de vista geotècnic com per la capacitat de suport. També, preveure el comportament d'aquests material a partir tant dels assajos realitzats in situ com els realitzats al laboratori. Una vegada es disposa de la caracterització del terreny del parc eòlic es podrà procedir al disseny i verificacions dels diferents mètodes de fallada.

Aquest apartat resumeix les principals característiques geotècniques que disposen les diferents formacions i que seran necessàries per al disseny de les cimentacions dels aerogeneradors. Els paràmetres són:

- La densitat aparent. Cal destacar que a part de la densitat del terreny, també serà necessària la densitat del formigó i del farcit.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	20,23	20,88	21,98	23,05
	20	21	22	23

Figura 55: Resum. Paràmetre densitat aparent

- Resistència a compressió simple

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Compressió simple (kPa)	3.000	3.333	4.409	6.740

Figura 56: Resum. Resistència a la compressió simple

- Angle de fregament

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Angle de fregament (°)	24	29	34	45

Figura 57: Resum. Paràmetre angle de fregament

- Cohesió

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Cohesió (MPa)	16	18	30	43

Figura 58: Resum. Paràmetre cohesió

- Mòdul de deformació

Font: Elaboració pròpia.

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
E' (MPa)	120	120	350	350

Figura 59: Mòdul de deformació de cada estrat

- Mòdul dinàmic

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
G <sub>din</sub> (MPa)	597,01	878,74	946,15	1.360,01
	597	879	946	1.360

Figura 60: Resum. Paràmetre mòdul dinàmic

## 13 Conclusions

En primer lloc cap destacar que seria necessari com s'ha remarcat anteriorment, realitzar una campanya de investigació geofísica. El principal motiu és el risc associat als materials compostos per algeps, ja que es traca d'un tipus de roca evaporítica. Aquest tipus de terrenys té associat la presència de cavitats com a conseqüència de la karstificació. En el present document s'ha considerat la no existència d'aquestes cavitats baix de la cimentació. Per tant, degut a la presència de roques evaporítiques junt a la existència segons biografia dels penya-segats de Falces (Navarra) de fractures obertes i cavitats prop de la ubicació del projecte actual, seria recomanable realitzar una investigació addicional per a verificar que la hipòtesis utilitzada en aquest document és l'adequada. Cal destacar que la hipòtesis emprada per a la realització d'aquest estudi es basa en la no existència de cavitats en els diferents assajos, ja que durant la recuperació de testimonis, no hi ha quasi perduda de material. A més a més, al ubicar-se en una zona elevada, l'aportació d'aigua que pot produir processos de dissolució que generen cavitats és únicament, l'aigua de la pluja

Per altra banda, un aspecte important a tindre en compte es el fenomen de l'expansivitat. Per tant, seria recomanable realitzar assajos com el de difracció de raigs X per a analitzar la presència d'anhidrita en les formacions evaporítiques. La presència d'aquest compost químic pot generar un augment del volum podent inclòs generar pressions elevades. D'aquesta manera, seria recomanable la realització d'assajos de laboratori per a descartar aquest fenomen o bé, si hi haguera, estudiar els efectes que tindria sobre la cimentació.

El col·lapse també és un aspecte a tractar. Com s'ha indicat no hi ha presència pròxima d'aigua però el canvi de humitat pot provocar aquest fenomen i canviar el seu comportament. Per tant, amb aquest canvi, la seua estructura introductòria, pot quedar destruïda provocant col·lapse i seients. Les principals recomanacions per a evitar aquest fenomen són:

- Control de les conduccions subterrànies, canonades, canalitzacions i sanejaments per a evitar fugues i trencaments que pugen alterar la humitat del terreny.
- Realització de l'execució de l'obra el més ràpid possible, evitant així la exposició prolongada del substrat amb la naturalesa.

Un altre aspecte a tindre en compte és la presència del nivell freàtic. Com s'ha explicat a l'apart corresponent, el registre d'aigua als sondejos varia bastant ràpid. Seria recomanable, un control periòdic de l'aigua a l'interior dels sondejos amb la finalitat de verificar si es tracta dels nivell freàtic del terreny i tindre-ho en compte per al disseny de l'estructura.

Seguidament, respecte l'agressivitat química, els sulfats presenten un atac mitjà. Per tant, s'utilitzarà un ciment sulfurresistiu amb tipus d'exposició Qb.

Destacar també la importància del càlcul de la rigidesa rotacional dinàmica. Els aerogeneradors són grans estructures que generen elevades càrregues i pressions dinàmiques. Per tant, s'ha d'evitar la interacció dinàmica del sòl amb la cimentació de la resta de la turbina. Aquest càlcul es pot aconseguir a partir d'assajos sísmics passius com s'ha realitzat en aquest document.

Finalment, mencionar que el terreny on recolzarà la cimentació es tracta de roques meteoritzades de diferents graus amb unes característiques geotècniques òptimes i components. Remarcar també la importància de realitzar un anàlisi el més detalladament possible del terreny on es construiran les estructures ja que és la base de tots els càlculs posteriors.

## 14 Referències

- BIENIAWSKI, Z.T. (1975). *The point load test in geotechnical practice*.
- BOWLES, J. (1996). *Foundation analysis and design*.
- CHALIKAKIS, K. & PLAGNES, V. (2011). *Contribution of geophysical methods to karst – system exploration: An overview*.
- 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.
- 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 cimientos*. Valencia: Editorial UPV.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A., CARRIÓN CARMONA, M. Á., & UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO. (2000). *Geotecnia y cimientos I: Complementos teóricos. problemas propuestos y resueltos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A. (2001). *Cuestiones de geotecnia y cimientos*. 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 based on seismic Rayleigh waves*.
- LÓPEZ, C. (2000). *Manual de sondeos*. Madrid
- MARCHETTI, S. MARCHETTI, D & VILLALOBOS, F. (2013). *El dilatómetro sísmico SDMT para ensayos de suelo insitu*. Italia
- MAZARIEGOS, A. (1993). *Reconocimientos del terreno*. Madrid
- MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN. *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.
- 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*. Pittsburgh.
- 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*
- 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 areas using component separation natural potential measurements*.





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)

---

## **Annex 02\_02 Disseny geotècnic dels fonaments**

Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

*Curs: 2019/2020*

*Autora: Benavent Benavent, Patricia*

*Tutor: Martínez Ibáñez, Víctor*

## Índex de figures

Figura 1: Perfil litològic proposat.....	6	Figura 30: Model del terreny per al disseny .....	22
Figura 2: Mesures nivell freàtic 4 de març del 2020 per al disseny de les cimentacions .....	6	Figura 31: Geometria proposada .....	22
Figura 3: Resistència a la càrrega puntual en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	7	Figura 32: Dimensions, volums i pes unitari .....	23
Figura 4: G <sub>din</sub> (assaig sísmica passiva) en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	7	Figura 33: Mòdul dinàmic ponderat segons la profunditat.....	24
Figura 5: Mòdul de deformació en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	7	Figura 34: Cohesió ponderada segons la profunditat .....	24
Figura 6: Densitat aparent en funció de la formació per al disseny de les cimentacions .....	7	Figura 35: Angle de fregament ponderat segons la profunditat.....	25
Figura 7: Contingut de sulfats en funció de la formació per al disseny de les cimentacions.....	7	Figura 36: Mòdul de deformació ponderat segons la profunditat .....	25
Figura 8: Angle de fregament en funció de la formació per al disseny de les cimentacions.....	7	Figura 37: Pes específic ponderat segons la profunditat .....	26
Figura 9: Cohesió en funció de la formació per al disseny de les cimentacions.....	8	Figura 38: Accions en la base de la torre i factor parcial segon l'Eurocodi 7 .....	26
Figura 10: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim .....	10	Figura 39: Accions en la base de la cimentació i dimensions efectives de la sabata .....	27
Figura 11: Secció tipus. Cotes en metres .....	11	Figura 40: Factors parcials segons l'Eurocodi 7.....	27
Figura 12: Càrregues en la base de la torre de l'aerogenerador.....	12	Figura 41: Paràmetres necessaris per la verificació del present mètode de fallada .....	28
Figura 13: Casos de càrrega en funció de la situació de disseny .....	12	Figura 42: Factors de capacitat de càrrega .....	29
Figura 14: Esquema volum necessari per a les verificacions. Cotes en metres.....	13	Figura 43: Verificació capacitat de càrrega .....	30
Figura 15: Esquema volums formigó. Cotes en metres .....	13	Figura 44: Factors parcials segons l'Eurocodi 7.....	30
Figura 16: Esquema volums farcit. Cotes en metres .....	14	Figura 45: Verificació lliscament entre cimentació i terreny .....	31
Figura 17: Esquema accions de partida.....	15	Figura 46: Verificació rigidesa rotacional dinàmica.....	31
Figura 18: Acció vertical modificada pel moment torsor .....	15	Figura 47: Verificació seients.....	32
Figura 19: Àrea efectiva el·lipse.....	16		
Figura 20: Dimensions efectives rectangle .....	16		
Figura 21: Formulació per a verificar el lliscament .....	18		
Figura 22: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim .....	18		
Figura 23: Capacitat de suport .....	19		
Figura 24: Factors de capacitat de càrrega .....	19		
Figura 25: Coeficients correctors de forma.....	19		
Figura 26: Coeficients correctors de inclinació de càrrega.....	19		
Figura 27: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim .....	20		
Figura 28: Mòdul de rigidesa rotacional dinàmica .....	20		
Figura 29: Mòdul de tallament dinàmic.....	21		

## ÍNDIX

<b>ÍNDIX DE FIGURES</b> .....	<b>2</b>	10.6 LLISCAMENT ENTRE LA CIMENTACIÓ I EL TERRENY.....	30
<b>1 INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>4</b>	10.7 RIGIDESA ROTACIONAL DINÀMICA.....	31
<b>2 OBJECTE</b> .....	<b>5</b>	10.8 SEIENTS.....	32
<b>3 DADES DE PARTIDA</b> .....	<b>6</b>	<b>11 RECOMANACIONS PER A L'EXCAVACIÓ</b> .....	<b>33</b>
3.1 PERFIL LITOLÒGIC.....	6	<b>12 CONCLUSIONS</b> .....	<b>34</b>
3.2 NIVELL FREÀTIC.....	6	<b>13 REFERÈNCIES</b> .....	<b>35</b>
3.3 COMPRESSIÓ SIMPLE.....	7		
3.4 MÒDUL DINÀMIC (SÍSMICA PASSIVA).....	7		
3.5 MÒDUL DE DEFORMACIÓ.....	7		
3.6 DENSITAT APARENT. DETERMINACIÓ DE LA DENSITAT I ASSAIG DE COMPRESSIÓ SIMPLE.....	7		
3.7 CONTINGUT DE SULFATS.....	7		
3.8 ANGLE DE FREGAMENT I COHESIÓ.....	7		
<b>4 PROCEDIMENT SEGUIT PER AL CÀLCUL DELS FONAMENTS</b> .....	<b>9</b>		
<b>5 CRITERIS DE COMBINACIÓ D'ACCIONS</b> .....	<b>10</b>		
<b>6 GEOMETRIA DE LA SECCIÓ</b> .....	<b>11</b>		
<b>7 DETERMINACIÓ DE LES CÀRREGUES</b> .....	<b>12</b>		
7.1 DENSITAT DEL FORMIGÓ DEL FONAMENT I DEL FARCIT. ALTRES MATERIALS.....	13		
7.2 OBTENCIÓ DELS VOLUMS NECESSARIS PER A LA VERIFICACIÓ DELS MÈTODES DE FALLADA.....	13		
7.3 MOMENT DE DISSENY.....	14		
7.4 CÀRREGA VERTICAL DE DISSENY.....	15		
7.5 CÀRREGA HORIZONTAL. CORRECCIÓ PEL MOMENT TORSOR.....	15		
7.6 ÀREA EFECTIVA DELS FONAMENTS.....	15		
7.7 TENSÍO DE REFERENCIA.....	16		
<b>8 MÈTODES DE FALLADA</b> .....	<b>17</b>		
<b>9 VERIFICACIÓ MÈTODES DE FALLADA</b> .....	<b>18</b>		
9.1 LLISCAMENT.....	18		
9.2 CAPACITAT DE SUPORT.....	18		
9.3 RIGIDESA ROTACIONAL DINÀMICA.....	20		
9.4 SEIENTS.....	20		
<b>10 RESULTATS DEL CÀLCUL ANALÍTIC DE LES CIMENTACIONS</b> .....	<b>22</b>		
10.1 BASES DE PARTIDA.....	22		
10.2 DIMENSIONS NECESSÀRIES PER AL CÀLCUL ESTRUCTURAL.....	23		
10.3 PARÀMETRES GEOTÈCNICS PONDERATS SEGONS LA PROFUNDITAT DE INFLUÈNCIA.....	24		
10.4 ACCIONS I COMBINACIONS CONSIDERADES.....	26		
10.5 CAPACITAT DE SUPORT MITJANÇANT MÈTODES ANALÍTICS.....	27		

## **1 Introducció**

Aquest parc eòlic localitzat a la Comunitat Foral de Navarra es troba situat a 3,5 km de Lodosa i a 6 km de Sesma. Consisteix en 5 aerogeneradors amb una potència de 2000 kW cadascun.

L'objectiu d'aquest Annex 02\_02 és analitzar els supòsits, les dades de partida i els aspectes geotècnics per al disseny de les cimentacions dels 5 aerogeneradors. A més, l'estudi present considera un dels aspectes principal que suposa la construcció d'aerogeneradors ja que es tracten d'estructures dinàmiques i per tant, cal verificar també el mode de fallada de la rigidesa rotacional dinàmica. Remarcar també que les estructures estudiades es troben recolzades sobre terreny molt competent, com ara roques, i per tant, aquesta verificació la complirà sense presentar grans inconvenients.

## **2 Objecte**

L'objectiu d'aquest document és establir les hipòtesis adoptades per al disseny geotècnic dels fonaments dels 5 aerogeneradors. A més a més, s'exposen les càrregues utilitzades i les justificacions d'elles. Per altra banda es verifiquen els modes de fallada de:

- La capacitat de suport
- El lliscament entre la cimentació i el terreny
- La rigidesa rotacional dinàmica
- Seients



### 3 Dades de partida

Les dades de partida per al disseny geotècnic s'han obtingut l'Annex 01\_02 on pot ser consultat el procés seguit de forma detallada.

En aquest apartat s'exposen de forma breu els paràmetres geotècnics que s'utilitzaran.

#### 3.1 Perfil litològic

Com es pot observar, principalment les formacions on recolzaran els aerogeneradors estan formades per substrat rocós meteoritzat en diferents graus. Per tant, per a optimitzar el disseny dels fonaments dels aerogeneradors, com es mostra a la següent imatge, s'han agrupat en un sol model. A més a més, a l'Annex 01\_02, s'ha explicat el motiu detalladament de l'homogeneïtzació dels 5 perfils litològics en un únic perfil de diferents estrats.

Font: Elaboració pròpia

Profunditat (m)		Perfil litològic proposat
De	A	
0	0,5	Terra vegetal
0,5	1	Argila llimosa
1	1,5	Substrat rocós alterat grau IV-III, argiles margoses, arenes, nòduls d'algeps
1,5	2	
2	2,5	
2,5	3	
3	3,5	
3,5	4	
4	4,5	
4,5	5	Substrat rocós alterat grau II, amb nòduls d'algeps
5	5,5	
5,5	6	
6	6,5	Substrat rocós IB format per algeps laminats
6,5	7	
7	7,5	
7,5	8	
8	8,5	
8,5	9	
9	9,5	
9,5	10	Substrat rocós sa
10	10,5	
10,5	11	
11	11,5	
11,5	12	
12	12,5	
12,5	13	
13	13,5	
13,5	14	
14	14,5	
14,5	15	
15	15,5	
15,5	16	
16	16,5	
16,5	17	
17	17,5	
17,5	18	
18	18,5	
18,5	19	

Profunditat (m)		Perfil litològic proposat
De	A	
19	19,5	
19,5	20	
20	20,5	
20,5	21	
21	21,5	
21,5	22	
22	22,5	
22,5	23	
23	23,5	
23,5	24	
24	24,5	
24,5	25	
25	25,5	

Figura 1: Perfil litològic proposat

#### 3.2 Nivell freàtic

No s'ha detectat la presència d'aigua superficial en els sondejos realitzats per al present document. A la tabla resum posterior, s'indica el nivell freàtic de cada sondeig i el nivell mitjà empleat per al disseny.

Font: Elaboració pròpia

Nivell freàtic (m)	
04/03/2020 després de buidar	
Sondeig 1	16,2
Sondeig 2	16,6
Sondeig 3	16
Sondeig 5	19,9
Sondeig 6	15,9
Mitjana	17

Figura 2: Mesures nivell freàtic 4 de març del 2020 per al disseny de les cimentacions

### 3.3 Compressió simple

Com s'ha indicat a l'inici d'aquesta secció, a l'Annex 01\_02 es pot trobar de manera detallada com s'ha obtingut cada valor de compressió simple per a cada formació IV-III, II, IB i I. A continuació es pot observar una tabla resum amb els paràmetres establerts per a cada substrat.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Compressió simple (kPa)	3.000	3.333	4.409	6.740

Figura 3: Resistència a la càrrega puntual en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

### 3.4 Mòdul dinàmic (sísmica passiva)

Seguidament, es mostra els paràmetres per a cada formació en referència al mòdul dinàmic. Remarcant la importància d'aquest mòdul ja que es característic de les estructures dinàmiques, és a dir, aquelles que generen moviment.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
G <sub>din</sub> (MPa)	597	879	946	1.360

Figura 4: G<sub>din</sub> (assaig sísmica passiva) en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

### 3.5 Mòdul de deformació

Al present apartat s'organitza la informació al paràmetre del mòdul de deformació per a cada formació.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
E' (MPa)	120	120	350	350

Figura 5: Mòdul de deformació en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

### 3.6 Densitat aparent. Determinació de la densitat i assaig de compressió simple

La densitat aparent s'ha determinat a partir de 2 assajos: "determinació de la densitat" i "assaig de compressió simple". Els paràmetres proposat per a cada substrat es resumeixen a la següent tabla.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	20	21	22	23

Figura 6: Densitat aparent en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

### 3.7 Contingut de sulfats

Aquest paràmetre s'ha obtingut a partir de l'assaig de contingut de sulfats solubles. Es pot observar el valor obtingut per a cada estrat a la següent tabla.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/kg de sòl sec)	10.178	5.964	11.112	9.379
Típus d'exposició	Qb	Qb	Qb	Qb

Figura 7: Contingut de sulfats en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

### 3.8 Angle de fregament i cohesió

Finalment, s'exposen els paràmetres d'angle de fregaments i cohesió.

Com s'explica a l'Annex 01\_02, aquests paràmetre s'aconsegueixen mitjançant la utilització del programa RocLab. S'introdueixen una sèrie de dades del terreny al programa informàtic per a que aquest mitjançant una sèrie de correlacions ens proporcione els valors d'angle de fregament i cohesió segon Mohr-Coulomb. Entre altres paràmetres d'entrada està la resistència a compressió uniaxial i el valor de RMR aconseguit mitjançant les relacions de González de Vallejo.

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Angle de fregament (°)	24	29	34	45

Figura 8: Angle de fregament en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

Font: Elaboració pròpia

	Formació IV-III	Formació II	Formació IB	Formació I
Cohesió (MPa)	16	18	30	43

Figura 9: Cohesió en funció de la formació per al disseny de les cimentacions

#### **4 Procediment seguit per al càlcul dels fonaments**

El mètode utilitzat per al correcte càlcul dels fonaments dels 5 aerogeneradors es descriu al següent apartat.

En primer lloc, es disposen d'unes dades de partida que consisteixen en un esquema d'accions al peu de l'aerogenerador, és a dir, en la base de la torre de l'estructura. Aquestes accions corresponen a les que transmeten l'aerogenerador al punt indicat. Per tant, es necessari la realització d'una sèrie de càlculs que s'explicaran en aquest document per a aconseguir les accions en la base de la cimentació de la sabata que suporta el total de l'aerogenerador.

Una vegada obtingudes les accions el procediment per al càlcul dels fonaments es descriu a continuació.

En primer lloc, es comprovarà l'estabilitat mecànica, és a dir, l'estabilitat front al lliscament. Seguidament, verificats aquest mètode de fallada, es confirmarà que el terreny on recolzen les estructures disposa de suficient rigidesa rotacional, capacitat de suport per a les tensions aplicades i verificar que els seients produïts són inferiors que els indicats per la norma, és a dir, inferiors a 3 mm/m. En el cas que algun mètode de fallada no es verifiqui, es valoraran solucions alternatives i rectificacions del disseny inicial.

## 5 Criteris de combinació d'accions

Per a les verificacions geotècniques de cimentacions superficials d'estat límit últim, s'ha utilitzat l'Eurocodi 7 (EN 1997-1). A més a més, el càlcul de l'estat últim GEO s'ha realitzat segon l' "Approach 2" del Eurocodi 7 mencionat anteriorment. Aquest criteri consisteix en aplicar factors parcial a les accions i a les resistències mentre que els paràmetres que depèn de sol queden sense aplicar cap factor. Per tant, com podem observar a la següent tabla , els factors utilitzats son A1, M1 i R2.

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

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

Figura 10: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim

Tal vegada, hi ha casos en els que la càrrega morta pugui ser tan favorable com desfavorable, d'aquesta manera, s'han estudiat ambdós casos, disposant-la com a favorable i com a desfavorable. Per altra banda, per al cas de càrrega en estat límit de servei (SLS) els factors utilitzats son de 1 ja que en les comprovacions s'utilitzen els valors característics.

A continuació es resumeix de manera breu els factors parcial que s'han d'utilitzar en cada paràmetre i mode de fallada.

- Capacitat de suport: 1.4
- Lliscament: 1.1
- Paràmetre de la cohesió: 1
- Paràmetre de la densitat: 1
- Paràmetre de l'angle de fregament: 1



## 6 Geometria de la secció

Les 5 cimentacions dels aerogeneradors s'unifiquen en una única tipologia de cimentació. La secció a analitzar es tracta de la cimentació circular de formigó d'un aerogenerador. La cota de cimentació tenint en compte el formigó de neteja és de -2,45 m i el seu diàmetre és de 19,5 m. Per altra banda, disposa d'un pedestal de diàmetre 5 m i la seua cota superior és de 0,70m. Es tracta d'una cimentació superficial. Les característiques geomètriques de la secció tipus es poden esquematitzar en la següent imatge.

Font: Elaboració pròpia

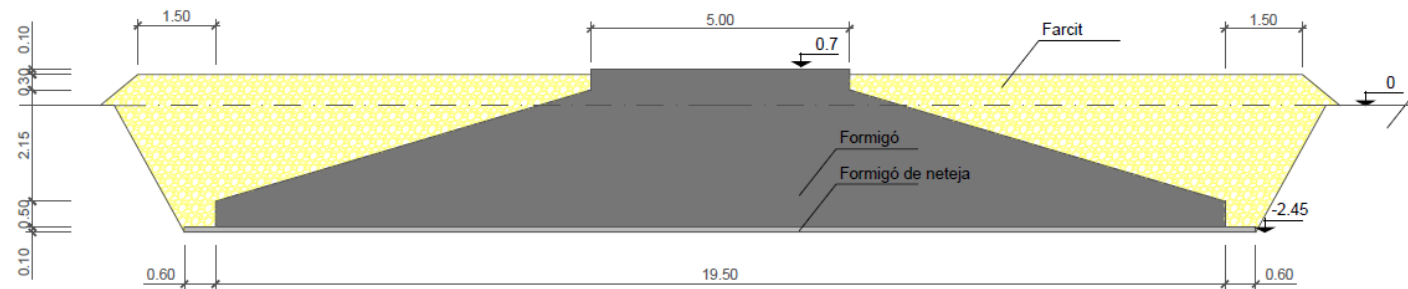


Figura 11: Secció tipus. Cotes en metres

El formigó de neteja disposa d'un espessor de 0,1 metres. Per altra part, l'estructura de la sabata està composta per tres altures. La primera d'elles es tracta de l'altura H1 la qual té un espessor de 0,5 metres i es troba en contacte amb el formigó de neteja. De la mateixa forma que el formigó de neteja, ambdós espessor es troben per baix del terreny natural on es localitza el parc eòlic de la Comunitat Foral de Navarra (Espanya). Seguidament, l'altura H2 disposa d'un espessor de 2,15 metre i, com es pot observar a la figura anteriorment adjuntada, part del seu espessor es troba per baix del terreny natural i una xicoteta porció està situada per damunt del terreny natural. A continuació, es localitza l'altura H3 amb un espessor de 0,3 metres, tota ella per damunt del terreny natural. Finalment, hi ha un petit espessor de formigó de 0,1 metres el qual es localitza per damunt del farcit que es troba sobre el terreny natural de la zona d'estudi.

Cal destacar també, com es representa gràficament a la figura anterior, un sobreample de 0,6 metres a la cota de cimentació de la sabata i de 1,5 metres a la cota del pedestal.

S'observa a més en la secció tipus, l'existència de farcit tant per damunt com per davall de la cota natural del terreny. D'aquesta manera cal garantir la durabilitat del farcit al llarg de la seua vida útil ja que va a ser un punt important per al càlcul estructural de les cimentacions dels aerogeneradors.

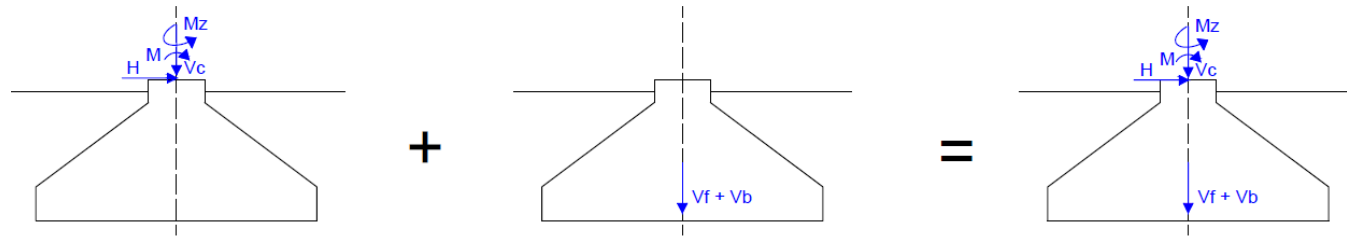
A més a més, cal destacar que si finalment hi haguera aigua, es podria dissenyar la mateixa tipologia constant a més d'una llosa de fons per a evitar que ascendeixi aigua per damunt del pla de suport de la cimentació.

## 7 Determinació de les càrregues

Com s'indica en l'objecte d'aquest document, es deu dimensionar i comprovar el fonament proposat per als aerogeneradors del parc eòlic. Cal remarcar, que al tractar-se d'aerogeneradors, aquests també tindran un efecte dinàmic sobre el terreny sobre el qual recolzen.

Com a base de partida, es disposen de les càrregues en la base de la torre de l'aerogenerador com s'indica a la següent imatge. A més a més, dels casos de càrrega que s'han de verificar.

Font: Dades de partida



Nom	Tipus	Vent			Càrrega morta	
		M	H	Mz	Vc	Vf+Vb
		kN.m	kN	kN.m	kN	kN
S3 (prob. 10-2) - DLC 1.1	SLS	89.450	920	3.030	5.520	Vc+Pes propi
S1 (charac. extreme) - DLC 1.5	SLS	105.200	985	315	5.520	Vc+Pes propi
Extreme Normal 1 - DLC 1.5	ULS	105.200	985	315	5.520	Vc+Pes propi
Extreme Normal 2 - DLC 1.5	ULS	105.200	985	315	5.520	Vc+Pes propi
Abnormal 3 - DLC 2.2	ALS	120.150	1.230	455	5.615	Vc+Pes propi
Abnormal 4 - DLC 2.2	ALS	120.150	1.230	455	5.615	Vc+Pes propi

Figura 12: Càrregues en la base de la torre de l'aerogenerador

M (moment de bolcada), H (força horitzontal) i Mz (moment torsor) representen la càrrega del vent. Vc fa referència a la càrrega vertical en la base de la torre de l'aerogenerador. Finalment Vf i Vb fan referència a la càrrega vertical composta pel pes de la sabata de formigó i del farcit. Aquests últims paràmetres s'hauran de calcular a partir de les densitats del formigó i farcit i de la geometria de la secció tipus. Cal remarcar que el nivell freàtic del terreny està molt per davall del pla de cimentació, i, per tant, el seu efecte no deu tenir-se en consideració.

Com a nota aclaridora i de simplificació, als càlculs estructurals, s'han emprat les següents reduccions:

- 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)

Per altra banda, segons el document "Guidelines for wind turbines", la força horitzontal en base de la cimentació es troba incrementada per l'efecte del moment torsor, Mz. D'aquesta forma, es tindrà en consideració l'acció horitzontal corregida en base de la cimentació, H'.

A continuació, es procedeix a explicar els diferents casos de càrrega que s'estudiaran segons la normativa UNE 61400:2007 referent als aerogeneradors.

Font: UNE 61400:2007

61400-1 © IEC:2007

- 71 -

Table 2 – Design load cases

Design situation	DL C	Wind condition	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factors
1) Power production	1.1	NTM $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$	For extrapolation of extreme events	U	N
	1.2	NTM $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$		F	*
	1.3	ETM $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$		U	N
	1.4	ECD $F_{hub} = F_r - 2 \text{ m/s}, F_r, F_r + 2 \text{ m/s}$		U	N
	1.5	EWS $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$		U	N
2) Power production plus occurrence of fault	2.1	NTM $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$	Control system fault or loss of electrical network	U	N
	2.2	NTM $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$	Protection system or preceding internal electrical fault	U	A
	2.3	EOG $F_{hub} = F_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $F_{out}$	External or internal electrical fault including loss of electrical network	U	A
	2.4	NTM $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$	Control, protection, or electrical system faults including loss of electrical network	F	*
3) Start up	3.1	NWP $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$		F	*
	3.2	EOG $F_{hub} = F_{in}, F_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $F_{out}$		U	N
	3.3	EDC $F_{hub} = F_{in}, F_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $F_{out}$		U	N
4) Normal shut down	4.1	NWP $F_{in} < F_{hub} < F_{out}$		F	*
	4.2	EOG $F_{hub} = F_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $F_{out}$		U	N
5) Emergency shut down	5.1	NTM $F_{hub} = F_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $F_{out}$		U	N
	6.1	EWM 50-year recurrence period		U	N
6) Parked (standing still or idling)	6.2	EWM 50-year recurrence period	Loss of electrical network connection	U	A
	6.3	EWM 1-year recurrence period	Extreme yaw misalignment	U	N
	6.4	NTM $F_{hub} < 0,7 F_{ref}$		F	*
	7.1	EWM 1-year recurrence period		U	A
8) Transport, assembly, maintenance and repair	8.1	NTM $F_{max}$ to be stated by the manufacturer		U	T
	8.2	EWM 1-year recurrence period		U	A

Figura 13: Casos de càrrega en funció de la situació de disseny

En primer lloc destacar el significat de les sigles SLS, ULS i ALS significat de manera respectiva estat límit de servei, estat límit últim i accidental. El codi DLC fa referència a la taula de la normativa UNE 61400:2007. D'aquesta manera DLC 1.1 i 1.5 descriuen una situació de producció d'energia i DLC 2.2 descriu la situació de producció d'energia més ocurrència de fallada. Per altra banda, indicar que la columna Vf+Vh fa referència al volum de formigó del fonament amb adició del farcit tant per damunt com per davall del terreny natural.

Les verificacions que van a realitzar-se són de capacitat de suport, lliscament, rigidesa rotacional dinàmica i seients. Tanmateix, no van a realitzar-se de tots els casos de càrrega. A continuació, s'exposen els que s'estudiaran.

Respecte la capacitat de suport o càrrega s'analitzaran els 6 casos. Per altra banda, el lliscament sols es verificarà per a 4 casos de càrrega, els corresponents a l'estat límit últim i al accidental. Tanmateix, respecte la rigidesa rotacional dinàmica i seients, sols es realitzarà per a l'estat últim de servei.

Seguidament, es descriu el procediment emprat per a l'obtenció de les diferents accions de disseny com de les tensions, aplicant el factor parcial corresponent, en la base del fonament a partir de les càrregues en la base de la torre per a poder realitzar les verificacions descrites anteriorment.

### 7.1 Densitat del formigó del fonament i del farcit. Altres materials

A part del terreny natural localitzat en cada ubicació dels aerogeneradors, existeixen altres materials necessaris per al disseny de les cimentacions. Aquests materials queden definits a continuació.

- Material de farcit: Material ubicat una vegada realitzada l'excavació pertinent tant damunt com per davall de la cota de terreny natural.
- Formigó en la pròpia cimentació
- Formigó de neteja. Aquest material es disposa entre la sabata i el terreny natural amb un espessor de 10 cm. Es recomana la seua utilització quan no existeix formigó de millora.

Per al càlcul de les tensions en el pla on recolza la base de la cimentació, a part de les càrregues de partida mencionades anteriorment, també es necessari el càlcul del pes propi del formigó del fonament i del farcit. Aquestes càrregues van a dependre de 2 factors: la geometria de la cimentació, és a dir, dels volums i de la unitat de pes utilitzada per al formigó i per al farcit.

El pes unitari per al formigó i per al farcit es el següent:

-Formigó: 25 kN/m<sup>3</sup>

-Farcit: 16 kN/m<sup>3</sup>

Cal destacar que en funció del mètode de fallada que s'estiga verifica, el formigó i el farcit actuaran com una acció favorable o desfavorable. Seguidament, es descriu com actuen en cada situació.

- Capacitat de suport: desfavorable
- Lliscament: favorable

### 7.2 Obtenció dels volums necessaris per a la verificació dels mètodes de fallada

Segons l'Eurocodi 7, per al càlcul de les diferents verificacions dels mètodes de fallada, és necessari les accions que generen tant el pes propi del formigó de la cimentació com l'acció que genera el pes propi del farcit tant per damunt com per davall del nivell natural del terreny. D'aquesta manera, a la següent imatge s'esquematisa quina proporció del farcit es deu de tindre en compte per al càlcul estructural. Per altra banda, recordar la necessitat de garantir la vida útil del farcit ja que com s'està exposant, forma part dels càlculs estructurals.

Com es pot observar a la següent imatge, el volum de farcit que s'ha de tindre en compte per a les verificacions és el delimitat per les línies discontinues.

Font: Elaboració pròpia

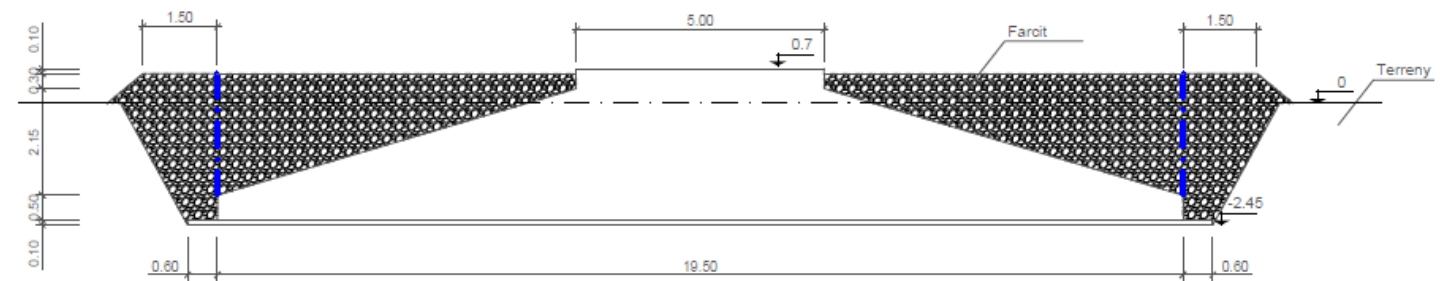


Figura 14: Esquema volum necessari per a les verificacions. Cotes en metres

A continuació, s'explica els volums necessaris per als càlculs de les verificacions.

Es necessari l'obtenció del volum que conforma l'estructura referent a la cimentació de formigó com el volum que ocupa el farcit tant per damunt com per davall del nivell natural del terreny. A més, tindre en compte, que el volum de farcit necessari, serà el que queda dintre de les línies discontinues de l'esquema.

- Volum de formigó

Per al seu càlcul s'ha dividit l'estructura en tres parts.

Font: Elaboració pròpia

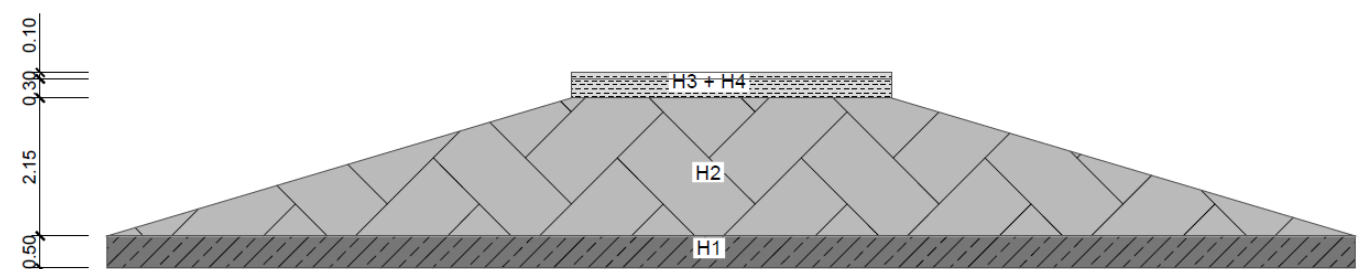


Figura 15: Esquema volums formigó. Cotes en metres

La primera ella correspon a l'altura H4+H3 i s'ha calculat el volum del formigó per a aquesta franja de la manera exposada a continuació.

$$(1) \quad Vol(H4 + H3) = \pi * r_{pedestal}^2 * (H4 + H3)$$

La següent divisió correspon a l'altura corresponent a H2. Aquesta capa s'ha tracta com si fora un tronc d'un con. Per tant, la formulació per al càlcul del volum és:

$$Vol(H2) = \frac{\pi * H2}{3} * (R_{base}^2 + r_{pedestal}^2 + R_{base} * R_{pedestal})$$

Finalment, l'última franja corresponent a la última franja H3, s'ha calculat segons la següent expressió:

$$(2) \quad Vol(H1) = \pi * R_{base}^2 * (H1)$$

D'aquesta manera, una vegada calculades cada franja, el volum total de formigó utilitzat a la sabata serà la suma de cada volum aconseguit anteriorment.

$$(3) \quad Vb = Vol(total) = Vol(H4 + H3) + Vol(H2) + Vol(H1)$$

Recordar que per al càlcul de l'acció que generar el formigó de la sabata, serà necessari multiplicar-ho pel pes específic del formigó.

- Volum de farcit dintre de les línies discontinues

En primer lloc, descompondrem aquest apartat en dos subapartats. Un corresponent al volum de farcit sobre el nivell natural de terreny (i dintre de les línies discontinues) i l'altre corresponent al farcit per davall del nivell de terreny.

Respecte al nivell de farcit sobre el nivell de terreny natural hi ha que considerar tant la part del farcit a la franja de la part proporcional a l'altura H2 per damunt del terreny natural com la franja corresponent a l'altura H3.

Per tant:

Franja corresponent a l'altura H3:

$$(4) \quad Vol(franjaH3) = \pi * \left(\frac{D_{base}}{2}\right)^2 * H3$$

$$(5) \quad Vol(formigóH3) = \pi * \left(\frac{D_{pedestal}}{2}\right)^2 * H3$$

$$(6) \quad Vol(farcitH3) = Vol(franjaH3) - Vol(formigóH3)$$

Per a la franja corresponent a l'altura H2 es seguirà el mateix procediment que per a la franja H2. Remarcar que sols es tindrà en compte una altura proporcional a H2 corresponent a la part que es troba per damunt del nivell del terreny natural. D'aquesta manera, el volum sobre el terreny natural quedarà definint com:

$$(7) \quad Vol(sobre terreny natural) = Vol(farcitH3) + Vol(farcitH2)$$

En segon lloc, en relació al nivell de farcit per davall de la cota del terreny natural, s'ha seguit el següent procediment.

S'ha calculat tot el volum corresponent a l'altura H2 i seguidament s'ha restat d'aquesta part, la part proporcional a l'estructura de la saba que s'ubica per baix del nivell del terreny natural.

$$(8) \quad Vol(davall terreny natural) = Vol(vol davall nivell natural) - Vol(sabata davall nivell natural)$$

Font: Elaboració pròpia

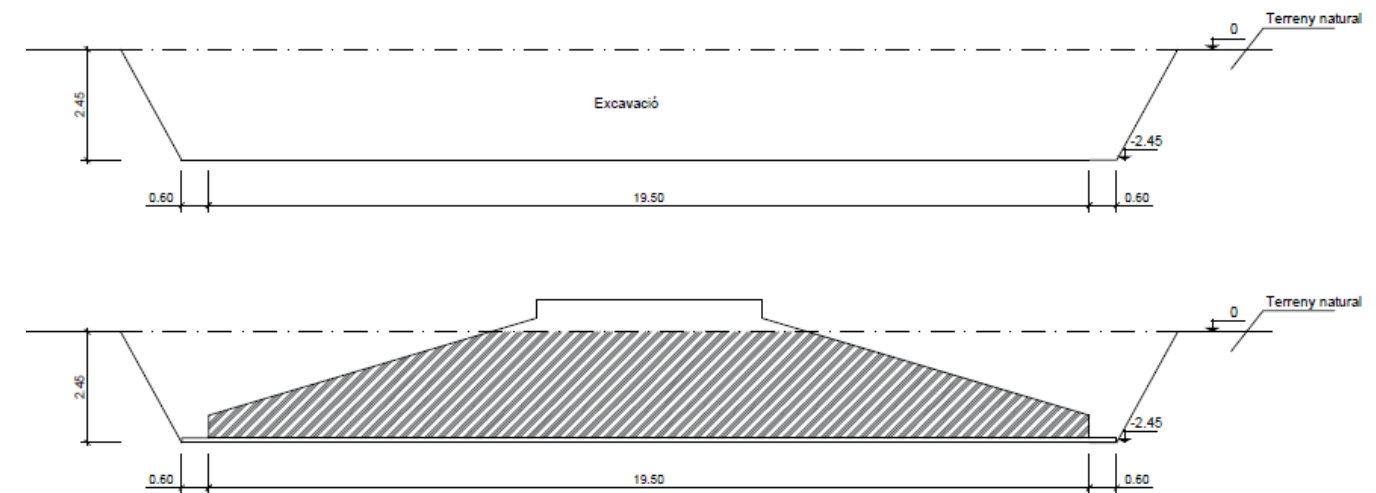


Figura 16: Esquema volums farcit. Cotes en metres

Finalment, el volum final es correspondrà a l'addició dels dos volums explicats anteriorment.

$$(9) \quad Vb = Vol(farcit) = Vol(davall terreny natural) + Vol(sobre terreny natural)$$

Tots els càlculs referents als volums, s'annexen al final d'aquest document.

### 7.3 Moment de disseny

Com s'ha explicat anteriorment, es disposen d'unes accions de partida a la base de la torre. Aquestes s'han de calcular a la base de la cimentació tenint en compte el factor parcial depenent de cada cas estudiat. Per lo tant, el moment de disseny es calcularà de la següent manera:

(10)  $M_d = M + \text{factor parcial vent} + H + \text{factor parcial vent} \cdot h$

Siguin h la distància vertical entre la base de la torre i la base de la cimentació.

Font: Dades de partida

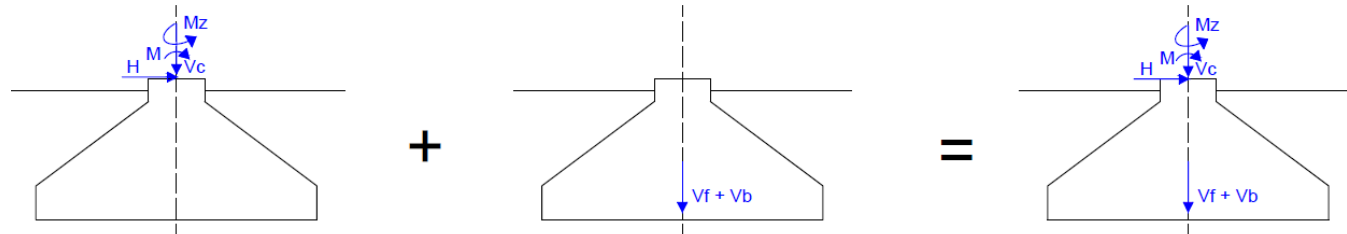


Figura 17: Esquema accions de partida

Per altra banda, cal aclarir que per al càlcul del moment de bolcada en la base de la cimentació, es tenen en consideració el moment de bolcada i l'acció H en base de la torre de l'aerogenerador. Els motius pels quals quan es té en consideració l'acció H i no l'acció horitzontal corregida en base de la cimentació (H') es descriuen a continuació.

- El moment torsor és un acció que no està relacionada amb la bolcada. D'aquest mode és inconscient la utilització de l'acció H' corregida pel moment torsor..
- Segons el document "Guidelines for wind turbines" l'acció corregida H' actua en la base de la cimentació.

#### 7.4 Càrrega vertical de disseny

La càrrega vertical de disseny tindrà en compte tant l'acció Vc proporcionada com a base de partida com l'acció provocada per la cimentació de formigó (Vc) i el farcit (Vb) tant per damunt com per davall del terreny natural. A més a més, si hi haguera aigua, també es tindria en compte. Per altra banda, cada acció estarà modificada per factor parcial corresponent. D'aquesta manera, l'acció vertical de disseny quedaria expressada de la següent forma:

(11)  $V_d = V_c + \text{factor parcial vent} + (V_f + V_c) + \text{factor parcial}$

#### 7.5 Càrrega horitzontal. Correcció pel moment torsor

Com s'indica al document "Guidelines for design of wind turbines", quan a part de les forces horitzontals (H) i verticals (V), també es aplica el moment torsor (Mz), la interacció entre la força H i el moment Mz es reemplaça per H'. Per tant, quan es realitzen els càlculs dels diferents mètodes de fallada, com ara la capacitat de suport, les forces a avaluar seran V i H'.

La 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

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

(12)

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)

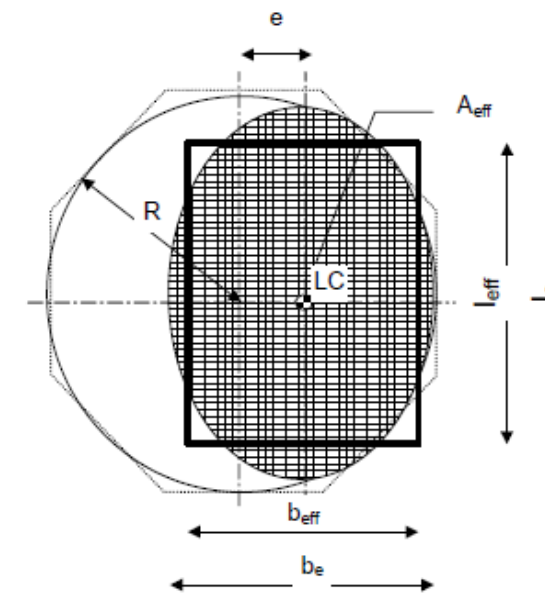
Figura 18: Acció vertical modificada pel moment torsor

#### 7.6 Àrea efectiva dels fonaments

Es realitza el càlcul de l'àrea efectiva ja que es necessita per al càlcul de la tensió de referència en la verificació de la capacitat de suport.

En el present cas que s'estudia l'àrea del fonament que s'ha dissenyat es circular amb radi R, d'aquesta manera l'àrea efectiva, com s'indica en el document "Guidelines for design of wind turbines" queda definida mitjançant una el·lipse segons la següent formulació.

Font: Guidelines for design of wind turbines



$$A_{eff} = 2 \left[ R^2 \arccos\left(\frac{e}{R}\right) - e \sqrt{R^2 - e^2} \right]$$

(13)



Amb els eixos:

$$(14) \quad b_e = 2(R - e)$$

$$(15) \quad l_e = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{b}{2R}\right)^2}$$

On:

- Aeff: àrea efectiva (m<sup>2</sup>)
- R: Radi del fonament (m)
- e: excentricitat de les càrregues (m)
- be: eix menor de l'el·lipse (m)
- le: eix major de l'el·lipse (m)

Figura 19: Àrea efectiva el·lipse

D'aquesta manera, l'àrea efectiva dels fonaments pot ser representada per un rectangle seguint la següent formulació.

Font: Guidelines for design of wind turbines

$$(16) \quad l_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{l_e}{b_e}} \quad \text{and} \quad b_{eff} = \frac{l_{eff}}{l_e} b_e$$

On:

- leff: eix major del rectangle (m)
- Aeff: àrea efectiva (m<sup>2</sup>)
- le: eix major de l'el·lipse (m)
- be: eix menor de l'el·lipse (m)
- beff: eix menor del rectangle (m)

Figura 20: Dimensions efectives rectangle

## 7.7 Tensió de referencia

Per al càlcul de la tensió de referencia, és a dir, la tensió en el terreny serà:

$$(17) \quad \text{tensió} = \frac{Vd}{A_{eff}}$$

On:

- Vd: càrrega vertical (kN)
- Aeff: àrea efectiva (m<sup>2</sup>)

La tensió obtinguda a partir de tot el procediment explicat, s'haurà de complimentar en les diferents verificacions.

## **8 Mètodes de fallada**

Segon l'Eurocodi 7 i les recomanacions del document Guidelines for design of wind turbines, els mètodes de fallada que es deuen considerar en l'estructura de gravetat analitzada han de ser els següents:

GEO. Trencament del terreny. Són aquelles fallades en les que la resistència del terreny juga un paper essencial.

El mètodes de fallada adscrits són:

- Lliscament entre el fonament i el terreny
- Capacitat portant

Seients.

A part, com es tracta d'un aerogenerador, es a dir, una estructura dinàmica es realitzarà també a la comprovació de la rigidesa rotacional dinàmica com s'indica en el document Guidelines for design of wind turbines.

En els següent apartats, es realitzaran les comprovacions de tots els mètodes mencionats anteriorment. Per a aquestes verificacions. S'han utilitzat les càrregues procedents dels apartats mostrats anteriorment.

## 9 Verificació mètodes de fallada

### 9.1 Lliscament

Aquest mètode de fallada es verifica entre el propi fonament (la sabata) i el terreny natural. Consisteix en assegurar que les accions horitzontals són menor que la resistència horitzontal de disseny.

Font: Eurocodi 7

$$H_d \leq H_{fallada} = \frac{A_{eff} \cdot \frac{c'}{\gamma_c} + V_d \cdot \tan \left( k \cdot \alpha \tan \left( \frac{\tan \phi_k}{\gamma_\phi} \right) \right) + E_{passiva}}{\gamma_{Rh}}$$

(18)

On:

- Aeff = àrea efectiva (m<sup>2</sup>)
- c': cohesió al nivell de la cimentació (kPa)
- Yc: factor de seguretat per a minorar la cohesió. Obtingut a l'Eurocodi 7 (adimensional)
- Vd: acció vertical a la base de la cimentació (kN)
- YRh: factor de residència front a lliscament (adimensional)
- Epassiva: 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)
- Yo: factor de seguretat per a minorar la resistència a tallament. Obtingut a l'Eurocodi 7 (adimensional)

Figura 21: Formulació per a verificar el lliscament

Els coeficient de cohesió, resistència al tallament i el factor de lliscament en cimentacions superficial es obtinguts, com ja s'ha anomenat anteriorment, a l'Eurocodi 7 segons el "Design Approach 2".

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

Design Approach 2		↓	↓	↓
Partial Factor Set		A1	M1	R2
Permanent Actions (G)	Unfavourable	Y <sub>G</sub>	1.35	
	Favourable	Y <sub>G,fav</sub>	1.0	
Variable Actions (Q)	Unfavourable	Y <sub>Q</sub>	1.5	
	Favourable	Y <sub>Q,fav</sub>	0.0	
Coefficient of shearing resistance (tan φ)		Y <sub>φ</sub>		1.0
Effective cohesion (c')		Y <sub>c'</sub>		1.0
Undrained shear strength (cu)		Y <sub>cu</sub>		1.0
Bulk unit weight (γ)		Y <sub>γ</sub>		1.0
Shallow Foundation	Bearing resistance (R <sub>v</sub> )	Y <sub>Rv</sub>		1.4
	Sliding resistance (R <sub>h</sub> )	Y <sub>Rh</sub>		1.1

Figura 22: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim

### 9.2 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<sub>0</sub>), la cohesió del terreny (c) i el pes propi (p).

Font: Eurocodi 7

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

(19)

On:

- R/Aeff=qd: capacitat de suport de disseny (kPa)
- Y': densitat (kN/m<sup>3</sup>)
- beff: ample efectiu del fonaments, calculada a l'apartat "Àrea efectiva dels fonaments" (m<sup>9</sup>)
- N<sub>γ</sub>: factor de capacitat de suport dependent de la densitat (adimensional)
- S<sub>γ</sub>: factor de forma dependent de la densitat (adimensional)
- i<sub>γ</sub>: factor de inclinació dependent de la densitat (adimensional)
- d<sub>γ</sub>: factor de profunditat dependent de la densitat (adimensional)

- $f_Y$ : factor d'àrea inclinada depenent de la densitat (adimensional)
- $q$ : pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (kPa)
- $N_q$ : factor de capacitat de suport depenent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- $s_q$ : factor de forma depenent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- $i_q$ : factor de inclinació depenent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- $d_Y$ : factor de profunditat depenent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- $f_Y$ : factor d'àrea inclinada depenent de la pressió efectiva de la sobrecàrrega a nivell del sòl-fonament (adimensional)
- $c_c$ : cohesió (kPa)
- $N_c$ : factor de capacitat de suport depenent de la cohesió (adimensional)
- $S_c$ : factor de forma depenent de la cohesió (adimensional)
- $i_c$ : factor de inclinació depenent de la cohesió (adimensional)
- $d_c$ : factor de profunditat depenent de la cohesió (adimensional)
- $f_c$ : factor d'àrea inclinada depenent de la cohesió (adimensional)

Figura 23: Capacitat de suport

Aquesta formulació s'utilitza tant per al càlcul a llarg com a curt termini, és a dir, per al càlcul en condicions drenades como no drenades. El factor de seguretat front al present mode de fallada es localitza a Design Approach 2 de l'Eurocodi 7. Per tant, una vegada calcula  $q_d$ , aplicant el factor parcial corresponent s'obté la pressió vertical admissible.

Les expressions per al càlcul dels diferents factors de càrrega s'exposen a continuació.

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

$$N_q = e^{\sigma \cdot \tan \phi'} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (20)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi' \quad (21)$$

$$N_\gamma = 1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi' \quad (22)$$

Figura 24: Factors de capacitat de càrrega

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

$$s_q = 1 + \frac{B_{eff}}{L_{eff}} \cdot \tan \phi' \quad (23)$$

$$s_c = \frac{(s_q \cdot N_q - 1)}{(N_q - 1)} \quad (24)$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \cdot \frac{B_{eff}}{L_{eff}} \quad (25)$$

Figura 25: Coeficients correctors de forma

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

$$i_q = \left[ 1 - \frac{H_d}{V_d + A_{eff} \cdot c' \cdot \cot \phi'} \right]^m \quad (26)$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \phi'} = \frac{i_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1} \quad (27)$$

$$i_\gamma = \left[ 1 - \frac{H_d}{V_d + A_{eff} \cdot c' \cdot \cot \phi'} \right]^{m-1} \quad (28)$$

$$\text{where } m = \frac{2 + \frac{B_{eff}}{L_{eff}}}{1 + \frac{B_{eff}}{L_{eff}}} \quad (29)$$

Figura 26: Coeficients correctors de inclinació de càrrega

Cal remarcar que els paràmetres de cohesió i angle de fregament utilitzats en la formulació per a l'obtenció de la càrrega de suport són els representatius a  $1.5 \cdot B_{eff}$  per baix del nivell de cimentació. D'aquesta manera per a calcular-ho a aquesta profunditat, serà necessari aconseguir l'espessor de cada estrat i la profunditat on es localitza

Per tant, es pot calcular mitjançant la següent formulació:

$$\text{Paràmetre equivalent} = \frac{\sum_1^n \text{Espessor de cada capa} \cdot \text{paràmetre de cada capa}}{1.5 \cdot B_{eff} - \text{cota de cimentació}} \quad (30)$$

Nota aclaridora: Les capes es consideren a partir del nivell de cimentació. Aquelles ubicades per damunt d'aquest pla, no es tenen en compte. A més a més, tampoc es tenen en compte, aquelles profunditats per davall del  $1.5 \cdot B_{eff}$ . Al final d'aquest document, es disposen de tots els càlculs referents a aquesta qüestió.

Una vegada obtinguda la capacitat de càrrega, aquesta serà afectada pel factor parcial de capacitat de càrrega 1.4 que s'expressa en l'Eurocodi 7 segons el "Design Approach 2".

Font: Eurocodi 7 (EN 1997-1)

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

Figura 27: Factors parcial utilitzats a l'estat límit últim

Cal destacar que els termes de cohesió i de pes específic de l'expressió de la capacitat de càrrega, també es veuran afectats pels factor parcial de l'Eurocodi 7. En el present cas, els valor d'aquests factors corresponen a 1.

Finalment, la capacitat de càrrega afectada pel factor parcial serà comparada per la tensió de referència sent aquest última menor per a que es verifique el mètode de fallada de capacitat de suport.

### 9.3 Rigidesa rotacional dinàmica

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,  $G_{din}$ .

Font: Guidelines for design of wind turbines

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

(31)

On:

- $K_{DYN}$ : mòdul de tallament dinàmic (MNm/rad)

- R: radi del fonament (m)
- $\nu$ : coeficient de Poisson (adimensional)
- $\beta_1$ : factor de reducció per el "levantament" de la sabata (adimensional)

Figura 28: Mòdul de rigidesa rotacional dinàmica

Cal remarcar que prèviament que, a l'annex 01\_02 s'ha obtingut el mòdul dinàmic ( $G_{dyn}$ ) per a cada estrat i per al càlcul de la rigidesa rotacional dinàmica s'ha emprat el mòdul dinàmic corresponent ponderat en funció de la influència de la sabata.

Com s'ha indicat en l'apartat de la capacitat de suport, al igual que els paràmetres de cohesió i angle de fregament, per al present càlcul de rigidesa rotacional dinàmica el resultat és el mateix. D'aquesta manera, per a calcular  $G_{dyn}$  es procedirà de la mateixa manera.

$$\text{Paràmetre equivalent} = \frac{\sum_1^n \text{Espesor de cada capa} \cdot \text{paràmetre de cada capa}}{0.5 \cdot B_{eff} - \text{cota de cimentació}}$$

(32)

Nota aclaridora: Les capes es consideren a partir del nivell de cimentació. Aquelles ubicades per damunt d'aquest pla, no es tenen en compte. A més a més, tampoc es tenen en compte, aquelles profunditats per davall del  $0.5 \cdot B_{eff}$ . Al final d'aquest document, es disposen de tots els càlculs referents a aquesta qüestió.

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

Com es pot observar als resultats finals, en conseqüència a la presència d'un terreny favorable i competent per als fonaments dels aerogeneradors, s'afirma que mitjançant els mètodes analítics emprats s'obté un marge de confiança elevat. D'aquesta manera, no es necessari el càlcul mitjançant elements finits (numèric).

### 9.4 Seients

Per a l'obtenció dels seients, s'utilitza la formulació de Jiménez 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

$$\theta = \frac{3}{4} \cdot \frac{1-\nu^2}{E \cdot R^3} \cdot M_{SL5}$$

(33)

On:

- $\theta$ : gir del fonament (rad)
- R: radi del fonament (m)
- $\nu$ : coeficient de Poisson (adimensional)

- E : mòdul de deformació (MPa)
- Msls : moment en un estat límit de servici (KN.m)

**Figura 29: 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

Com ja s'ha anomenat anteriorment, en aquest cas també es realitzarà càlculs a  $0.5 \cdot B_{eff}$  per davall del nivell de cimentació dels paràmetres de mòdul de deformació i coeficient de Poisson.

(34) 
$$\text{Paràmetre equivalent} = \frac{\sum_1^n \text{Espesor de cada capa} \cdot \text{paràmetre de cada capa}}{0.5 \cdot B_{eff} - \text{cota de cimentació}}$$

Nota aclaridora: Les capes es consideren a partir del nivell de cimentació. Aquelles ubicades per damunt d'aquest pla, no es tenen en compte. A més a més, tampoc es tenen en compte, aquelles profunditats per davall del  $0.5 \cdot B_{eff}$ . Al final d'aquest document, es disposen de tots els càlculs referents a aquesta qüestió.



## 10 Resultats del càlcul analític de les cimentacions

Aquest apartat té com objectiu principal introduir mitjançant tables tota la informació necessària per a la correcta comprensió del document al que dona suport.

### 10.1 Bases de partida

Font: Elaboració pròpia

MODEL DEL TERRENY/PERFIL LITOLÒGIC									
	De (m)	A (m)	Espessor (m)	Densitat aparent (kN/m <sup>3</sup> )	v	Angle de fregament (°)	Cohesió (Mpa)	Mòdul de deformació (Mpa)	G dinàmic (Mpa)
Formació IV-III	0,00	2,55	2,55	20	0,30	24	16	120	597
Formació IV-III	2,55	4,00	1,45	20	0,30	24	16	120	597
Formació II	4,00	6,50	2,50	21	0,30	29	18	120	879
Formació IB	6,50	12,50	6,00	22	0,30	34	30	350	946
Formació I	12,50	25,50	13,00	23	0,30	45	43	350	1.360

Nivell freàtic (m)	16
--------------------	----

Cota cimentació (m)	-2,45
---------------------	-------

Figura 30: Model del terreny per al disseny

Font: Elaboració pròpia

GEOMETRIA PROPOSSADA					
Base	Circular	Altura cimentació (m)	H1	0,50	H pendent formigó de neteja 2,00
Diàmetre base (m)	19,5		H2	2,15	
Diàmetre pedestal (m)	5,0		H3	0,30	
Radi base (m)	9,8		H4	0,10	
		Formigó de neteja	0,10	V pendent formigó de neteja 3,00	
Nivells (m)	Excavació (amb formigó de neteja)	-2,45	Farcit per damunt del sòl natural (m)	0,40	
	Cimentació	-2,35	H pendent farcit	4,00	
	Sòl natural	0,00	V pendent farcit	2,00	
	Pedestal	0,70	Sobre ample (m) en la cota superior del farcit	1,50	
			Sobre ample (m) en la cota inferior del farcit	0,60	

Figura 31: Geometria proposada

## 10.2 Dimensions necessàries per al càlcul estructural

Font: Elaboració pròpia

Dimensions (m)	
Diàmetre Base excavació estreta	19,50
Diàmetre Base excavació més àmplia	21,95
Radi Base excavació estreta	9,75
Radi Base excavació més àmplia	10,98
Radi mínim farcit pendent	11,25
Radi màxim farcit pendent	12,05

Volums (m <sup>3</sup> )	
Formigó de neteja	33,9
Excavació	961,5
Farcit sobre el nivell natural del terreny (dins de la línia discontinua)	164,7
Farcit sobreample (sobre el nivell natural del terreny)	39,6
Farcit pendent (sobre el nivell natural del terreny)	11,6
Farcit per davall del nivell natural del terreny	503,9
Franja H2 (farcit + estructura) per davall del nivell natural del terreny	552,5
Estructura per davall del nivell natural (sense tindre en compte el H1)	274,4
Farcit sobre el nivell natural del terreny (dins de la línia discontinua)	278,1
Franja H3 (farcit + estructura)	89,6
Estructura franja H3+H4	7,85
Farcit H3	83,7
Estructura completa Con (referida a H2)	283,0
Estructura franja H1	149
Franja H2 per sobre el nivell natural del terreny	89,6
Farcit franja H2 sobre el nivell natural del terreny	81,0
Farcit per davall del terreny natural (amb sobreample i pendent)	215,9
Estructura per davall de ZTN (sense tindre en compte el formigó de neteja)	423,7
Tota estructura	439,9
Farcit per davall de ZTN (dins de la línia discontinua)	253,9

Pes unitari (kN/m <sup>3</sup> )	
Formigó	25
Farcit	16
Farcit submergit	6
Farcit saturat	19

Figura 32: Dimensions, volums i pes unitari

### 10.3 Paràmetres geotècnics ponderats segons la profunditat de influència

Font: Elaboració pròpia

	Gdyn (Mpa)											
	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6	
	0,5-Beff	1,5-Bfff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff
	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119
	866	866	866	866	866	866	866	866	866	866	866	866
	2.198	2.198	2.198	2.198	604	2.198	1.958	2.198	1.853	2.198	968	2.198
	737	5.676	167	5.676		2.705		5.676		5.676		3.883
		6.305		3.848				2.015		1.531		
<b>Resultat</b>	<b>795</b>	<b>1.026</b>	<b>774</b>	<b>979</b>	<b>680</b>	<b>840</b>	<b>759</b>	<b>935</b>	<b>755</b>	<b>921</b>	<b>710</b>	<b>856</b>

Figura 33: Mòdul dinàmic ponderat segons la profunditat

Font: Elaboració pròpia

	c'd kN/m2											
	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6	
	0,5-Beff	1,5-Bfff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	45	45	45	45	12	45	40	45	38	45	20	45
	23	180	5	180	-	86	-	180	-	180	-	123
	-	199	-	122	-	-	-	64	-	48	-	-
<b>Resultat</b>	<b>19</b>	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>29</b>	<b>17</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>24</b>

Figura 34: Cohesió ponderada segons la profunditat

Font: Elaboració pròpia

	$\varphi'd$ (°)											
	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6	
	0,5-Beff	1,5-Bfff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff
	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8
	72,5	72,5	72,5	72,5	19,9	72,5	64,6	72,5	61,1	72,5	31,9	72,5
	26,5	204,0	6,0	204,0	-	97,2	-	204,0	-	204,0	-	139,6
	-	208,6	-	127,3	-	-	-	66,7	-	50,7	-	-
<b>Resultat</b>	<b>28</b>	<b>35</b>	<b>27</b>	<b>34</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>27</b>	<b>33</b>	<b>27</b>	<b>33</b>	<b>26</b>	<b>30</b>

Figura 35: Angle de fregament ponderat segons la profunditat

Font: Elaboració pròpia

	E' (MPa)											
	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6	
	0,5-Beff	1,5-Bfff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff
	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0	174,0
	300,0	300,0	300,0	300,0	82,4	300,0	267,3	300,0	253,0	300,0	132,2	300,0
	272,5	2.100,0	61,8	2.100,0	-	1.000,9	-	2100,0	-	2.100,0	-	1.436,7
	-	1.622,6	-	990,3	-	-	-	518,7	-	394,0	-	-
<b>Resultat</b>	<b>156</b>	<b>285</b>	<b>129</b>	<b>276</b>	<b>120</b>	<b>214</b>	<b>120</b>	<b>268</b>	<b>120</b>	<b>265</b>	<b>120</b>	<b>234</b>

Figura 36: Mòdul de deformació ponderat segons la profunditat

Font: Elaboració pròpia

	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )											
	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6	
	0,5-Beff	1,5-Bfff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff	0,5-Beff	1,5-Beff
	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
	52,5	52,5	52,5	52,5	14,4	52,5	46,8	52,5	44,3	52,5	23,1	52,5
	17,1	125,6	3,9	99,1	-	11,5	-	79,3	-	74,1	-	29,8
<b>Resultat</b>	20,8	21,4	20,7	21,3	20,3	20,8	20,6	21,3	20,6	21,2	20,4	20,9

Figura 37: Pes específic ponderat segons la profunditat

## 10.4 Accions i combinacions considerades

Font: Elaboració pròpia

Accions en la base de la torre de l'aerogenerador

	Vent			Pes mort		Aigua
	M (kN.m)	H (kN)	Mz (kN.m)	Vc (kN)	Formigó + tot farcit (KN)	W (kN)
Cas 1	89.450	920	3.030	5.520	17.935	0
Cas 2	105.200	985	315	5.520	17.935	0
Cas 3	105.200	985	315	5.520	17.935	0
Cas 4	105.200	985	315	5.520	17.935	0
Cas 5	120.150	1.230	455	5.615	17.935	0
Cas 6	120.150	1.230	455	5.615	17.935	0

Factors Parcial segons l'Eurocodi 7

	Vent (M,H,Mz)	Vc	Formigó + tot farcit (KN)	Aigua
Cas 1	1	1	1	1
Cas 2	1	1	1	1
Cas 3	1,5	1	1	1
Cas 4	1,5	1,35	1,35	1
Cas 5	1,1	1,1	1,1	1
Cas 6	1,1	0,9	0,9	1

Figura 38: Accions en la base de la torre i factor parcial segon l'Eurocodi 7

Font: Elaboració pròpia

Accions en la base de la cimentació					
	Md (kN.m)	Hd (KN)	Vt,d (kN)	e (m)	$\sigma_{ref}$ (kPa)
Cas 1	92.468	1.404	23.455	3,94	157
Cas 2	108.431	1.029	23.455	4,62	187
Cas 3	162.646	1.563	23.455	6,93	441
Cas 4	162.646	1.547	31.665	5,14	293
Cas 5	136.603	1.428	25.905	5,27	250
Cas 6	136.603	1.438	21.195	6,44	316

Dimensions efectives sabata					
	be (m)	le (m)	Aeff (m2)	leff (m)	beff (m)
Cas 1	11,62	17,83	149,20	15,14	9,86
Cas 2	10,25	17,17	125,36	14,49	8,65
Cas 3	5,63	13,71	53,16	11,38	4,67
Cas 4	9,23	16,57	108,02	13,93	7,75
Cas 5	8,95	16,40	103,51	13,77	7,52
Cas 6	6,61	14,63	67,04	12,18	5,50

Nota aclaridora	
	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)

Figura 39: Accions en la base de la cimentació i dimensions efectives de la sabata

## 10.5 Capacitat de suport mitjançant mètodes analítics

Font: Elaboració pròpia

Factors de seguretat segons l'Eurocodi 7

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

Capacitat de suport ( $\gamma R_v$ )	1,40
Angle de fregament ( $\tan \phi'$ , $\gamma \phi$ )	1,00
Cohesió ( $\gamma c'$ )	1,00

Figura 40: Factors parcials segons l'Eurocodi 7



Font: Elaboració pròpia

Paràmetres geotècnics proporcional necessaris per a la present verificació						Dimensions efectives sabata		
		$\gamma_{sup}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{inf}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (1'5*B <sub>eff</sub> ) (kN/m <sup>2</sup> )	$\varphi'$ (1'5*B <sub>eff</sub> ) (°)		l <sub>eff</sub> (m)	b <sub>eff</sub> (m)
Cas 1	SLS	20	21,4	30,5	35,5	Cas 1	15	10
Cas 2	SLS	20	21,3	28,7	34,2	Cas 2	14	9
Cas 3	ULS	20	20,8	22,4	29,9	Cas 3	11	5
Cas 4	ULS	20	21,3	27,1	32,9	Cas 4	14	8
Cas 5	ALS	20	21,2	26,6	32,5	Cas 5	14	8
Cas 6	ALS	20	20,9	23,6	30,5	Cas 6	12	6

Profunditat nivell de cimentació (m)	2,35
Profunditat no necessària per a la sobrecàrrega (m)	2,35

Càrregues			
	Hd (kN)	Vd (kN)	tan $\delta$
Cas 1	1.404	23.455	0,05
Cas 2	1.029	23.455	0,04
Cas 3	1.563	23.455	0,06
Cas 4	1.547	31.665	0,04
Cas 5	1.428	25.905	0,05
Cas 6	1.438	21.195	0,06

Figura 41: Paràmetres necessaris per la verificació del present mètode de fallada

Font: Elaboració pròpia

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6		
Factor de càrrega (n)	Nq	35,39	30,03	18,12	25,81	24,66	19,45	$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi'} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right)$	$i_q = \left[ 1 - \frac{H_d}{V_d + A_{eff} \cdot c' \cdot \cot \phi'} \right]^m$
	Nc	48,23	42,78	29,81	38,33	37,10	31,34		
	Ny	36,78	29,56	14,74	24,08	22,63	16,29		
Factor de forma (s)	sq	1,38	1,34	1,20	1,30	1,29	1,23	$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi'$	$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \phi'} = \frac{i_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$
	sc	1,39	1,35	1,22	1,31	1,31	1,24		
	sy	0,74	0,76	0,84	0,78	0,78	0,82		
Factor de inclinació (i)	iq	0,93	0,94	0,90	0,93	0,92	0,90	$N_\gamma = 1,5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi'$	$i_\gamma = \left[ 1 - \frac{H_d}{V_d + A_{eff} \cdot c' \cdot \cot \phi'} \right]^{m+1}$
	ic	0,92	0,94	0,89	0,93	0,92	0,90		
	iy	0,88	0,91	0,84	0,89	0,88	0,85		
	m	1,61	1,63	1,71	1,64	1,65	1,69		
Factor de profunditat (d)	dq	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	$s_q = 1 + \frac{B_{eff}}{L_{eff}} \cdot \tan \phi'$	$\text{where } m = \frac{2 + \frac{B_{eff}}{L_{eff}}}{1 + \frac{B_{eff}}{L_{eff}}}$
	dc	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
	dy	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
Sloping area (t)	tq	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	$s_c = \frac{(s_q \cdot N_q - 1)}{(N_q - 1)}$	$s_\gamma = 1 - 0,4 \cdot \frac{B_{eff}}{L_{eff}}$
	tc	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
	ty	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		

Figura 42: Factors de capacitat de càrrega

Font: Elaboració pròpia

	q - terme (kPa)	c - term (kPa)	γ - term (kPa)	Capacitat de suport (kPa)	Resistència de disseny (kPa)	Resistència de pressió (kPa)	Utilització del factor (%)	<100%
Cas 1	0	1.886	2.531	4.417	3.155	157	4,98	OK
Cas 2	0	1.558	1.886	3.444	2.460	187	7,61	OK
Cas 3	0	725	504	1.229	878	441	50,27	OK
Cas 4	0	1.267	1.374	2.641	1.887	293	15,54	OK
Cas 5	0	1.185	1.242	2.427	1.734	250	14,43	OK
Cas 6	0	821	651	1.472	1.051	316	30,07	OK

Nota aclaridora	
	q - terme : q · Nq · bq · sq · iq · dq · tq
	c - terme : c' · Nc · bc · sc · ic · dc · tc
	γ - terme : 0.5 · γinf · Beff · Ny · by · sy · iy · dy · ty

$$\Lambda_{\text{Bearing}} = \frac{R_d}{S_d} = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{q_d}$$

Figura 43: Verificació capacitat de càrrega

## 10.6 Lliscament entre la cimentació i el terreny

Font: Elaboració pròpia

Resistència al lliscament (γRh)	ULS	1,10
Resistència al lliscament (γRh)	ALS	1,10
Angle de freament (tan φ', γφ)		1,00
Cohesió (γc')		1,00
Coeficient de fricció, k		1,00

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

Figura 44: Factors parcials segons l'Eurocodi 7

Font: Elaboració pròpia

	Vd (kN)	Hfailure,max (kN)	Hd (kN)	Càrrega de seisme	Utilització del factor (%)	<100%
Cas 3	23.455	12.159	1.563	NO	12,85	OK
Cas 4	31.665	16.975	1.547	NO	9,11	OK
Cas 5	25.905	14.122	1.428	NO	10,11	OK
Cas 6	21.195	11.281	1.438	NO	12,74	OK

Figura 45: Verificació lliscament entre cimentació i terreny

## 10.7 Rigidesa rotacional dinàmica

Font: Elaboració pròpia

Segons el document inicial de càrregues, la rigidesa rotacional dinàmica mínima :		K <sub>φ,dyn,Min</sub>	270.000	MNm/rad
Els paràmetres G <sub>dyn,eq</sub> i ν <sub>eq</sub> són considerats a una profunditat:		0,5·B <sub>eff</sub>	per baix del nivell de cimentació	
β <sub>1</sub> ratio entre l'àrea total i la comprimida				
D, cimentació baix terreny natural (m)		2,35		

$$K_{\phi,DYN} = \frac{8}{3} \cdot \frac{G_{DYN,eq} \cdot R^3}{(1-\nu_{eq})} \cdot \beta_1 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{D}{R}\right)$$

	e/φ	β <sub>1</sub>	G <sub>dyn,eq</sub> (MPa)	ν <sub>eq</sub>	K <sub>φ,dyn</sub> (MNm/rad)	> K <sub>φ,dyn,Min</sub>
Cas 1	0,20	0,79	795,18	0,30	11.027.456	OK
Cas 2	0,24	0,61	774,18	0,30	973.038	OK

Figura 46: Verificació rigidesa rotacional dinàmica

## 10.8 Seients

Font: Elaboració pròpia

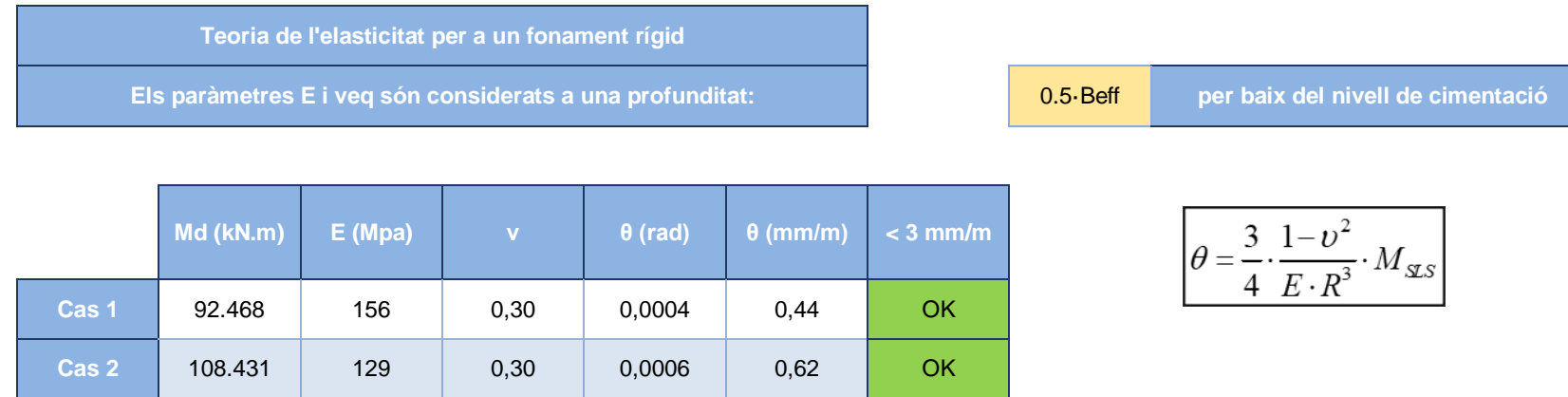


Figura 47: Verificació seients

## 11 Recomanacions per a l'excavació

A continuació es recomanen una sèrie de procediments per a tindre en compte quan es realitzen les excavacions de les 5 cimentacions dels aerogeneradors i la preparació dels seu fons d'excavació.

- Es recomanable que l'excavació estiga oberta el menor temps possible per a evitar així el mínim contacte amb fenòmens atmosfèrics adversos.
- No deu existir aigua en el fons de l'excavació. Si durant l'excavació es localitza aigua, el disseny no serà vàlid i es s'hauran de tornar a realitzar tots els càlculs.
- El fons de l'excavació serà inspeccionat per un geòleg per a identificar qualsevol indicatiu de karstificació. En el cas de trobar alguns buits, s'ompliran amb cura amb el material corresponent. A més, si a la cota on recolzarà la cimentació existeix una capa d'argila d'un espessor considerable (dintre de la formació del macís rocós), aquesta capa deurà ser excavada i reemplaçar-la per un altre tipus de material com ara formigó de neteja o un material adequadament compactat per a tindre un fons homogeni abans de abocar el formigó.
- Presència d'un geòleg per a verificar que les hipòtesis emprades al disseny referents als materials i nivell freàtic són compatibles amb les observades in situ.
- Les inclinacions de les excavacions deuen adequar-se a les condicions del terreny. Si el terreny es menys competent, les inclinacions seran més horitzontals.
- El fons deurà ser netejat abans de l'abocament del formigó.
- Garantir la vida útil del farcit ja que s'ha tingut en compte per als càlculs estructurals de la cimentació



## 12 Conclusions

En aquest document s'ha realitzat el dimensionament i disseny del fonament de la secció tipus de l'aerogenerador ja que, s'han unificat el perfil litològic i els paràmetres de les 5 localitzacions en una sola.

En primer lloc, a partir de les accions en la base de la torre de l'aerogenerador s'han aconseguit aquests però a la base de la cimentació. A part, s'han calculat les accions corresponents tant al formigó del fonament com al farcit que envolta aquest. Amb aquestes accions (considerant els seus factors parcials corresponents) i els paràmetres obtinguts a l'Annex 01\_02 d'aquest TFM, s'ha dimensionat la sabata tipo. Aquesta sabata de 19,5 metres de radi i cimentada a la cota -2,45 m deu de complir les verificacions geotècniques de lliscament, capacitat de suport, rigidesa rotacional i seients.

Cal remarcar que s'ha de garantir la vida útil del farcit en tota la superfície, és a dir, tant aquell situat per damunt del terreny natural com per davall d'aquesta cota ja que s'ha utilitzat per als càlculs estructurals de la cimentació.

Per al perfil litològic proposat a l'Annex 01\_02 i els seus paràmetres corresponents, s'estudien les següent comprovacions:

- Les combinacions d'accions es realitzen segons els factors parcials emprant a l'Eurocodi 7.
- La tensió admissible del terreny es major que les tensions generades per l'estructura a aquest terreny. Aquestes tensions de l'estructura s'han obtingut a partir de les accions de partida i el pes propi (pes del fonament addicionat amb el farcit). La verificació de la capacitat de suport es realitza segons la formulació de Brinch – Hansen.
- El lliscament compleix que l'efecte de les accions horitzontals son menors que la resistència horitzontal de disseny.
- Verificació analítica dels seients per als casos d'estat límit se servei.
- Compliment de la rigidesa mitjançant mètodes analítics rotacional dinàmica resultant aquesta major que la mínima exigida per a la torre de l'aerogenerador. A més a més, degut al terreny competent que es disposa, no es necessari el càlcul de la rigidesa dinàmica rotacional mitjançant mètodes numèrics.

## 13 Referències

- ANDRÉS, C. (2012). *Ondas sísmicas y sensores inalámbricos: herramientas potenciales para la prospección de subsuelos a baja profundidad*.
- BRAN SÁNCHEZ, J. (2009). *Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el Salvador*.
- 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.
- D.N.V, RISO. (2002). *Guidelines for design of wind turbines*. Copenhagen.
- 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.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I, FERRER., M., ORTUÑO, L., & OTEO, C. (2003). *Ingeniería geológica*. Madrid.
- 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 cimientos*. Valencia: Editorial UPV.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A., CARRIÓN CARMONA, M. Á., & UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO. (2000). *Geotecnia y cimientos I: Complementos teóricos. problemas propuestos y resueltos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- IZQUIERDO SILVESTRE, F. A. (2001). *Cuestiones de geotecnia y cimientos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Madrid.
- MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA.(2009). *Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)*. Madrid.
- NISTAL, J. (2015). *Modelado y control dinámico de un aerogenerador*. Cantabria.
- 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.



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 2: Plans

Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

*Curs: 2019/2020*

*Autora: Benavent Benavent, Patricia*

*Tutor: Martínez Ibáñez, Víctor*

## ÍNDEX

01\_04 Situació i emplaçament

02\_04 Situació aerogeneradors

03\_04 Detall secció tipus

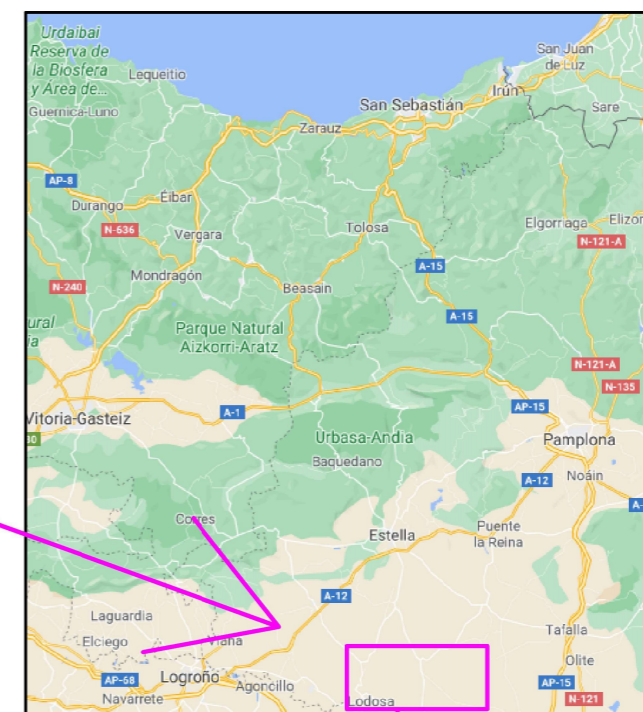
04\_04 Secció tipus amb el perfil litològic



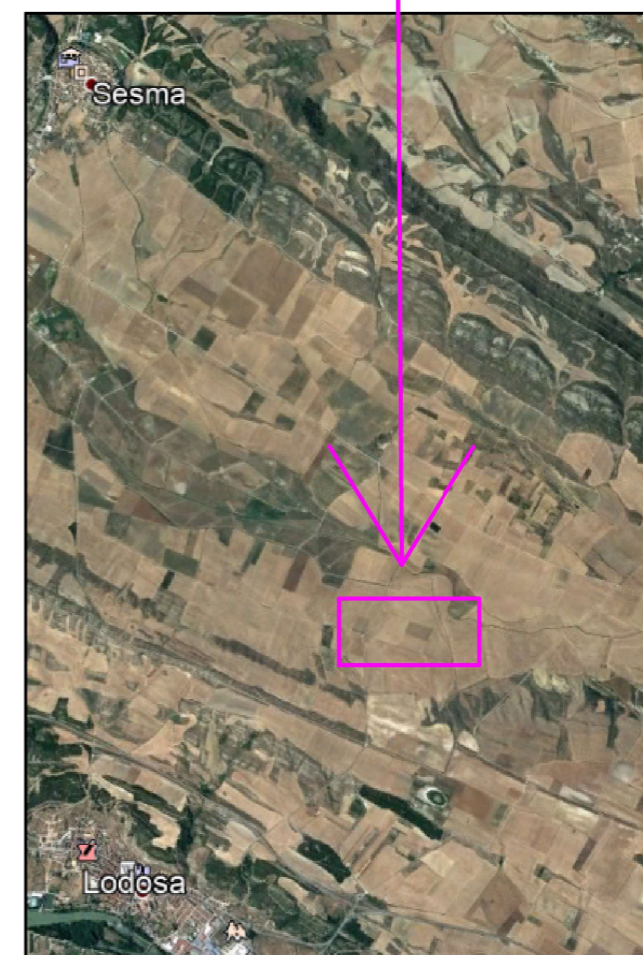


Situació ESC. 1/6400000

 Zona d'actuació



Emplaçament  
ESC. 1/1200000



ESC. 1/55000




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



Títol  
DISSENY GEOTÈCNIC DELS FONAMENTS PER A UN PARC  
EÒLIC A LA COMUNITAT FORAL DE NAVARRA (ESPANYA)

AUTORA  
BENAVENT BENAVENT, PATRICIA  


TUTOR  
MARTÍNEZ IBÁÑEZ, VÍCTOR

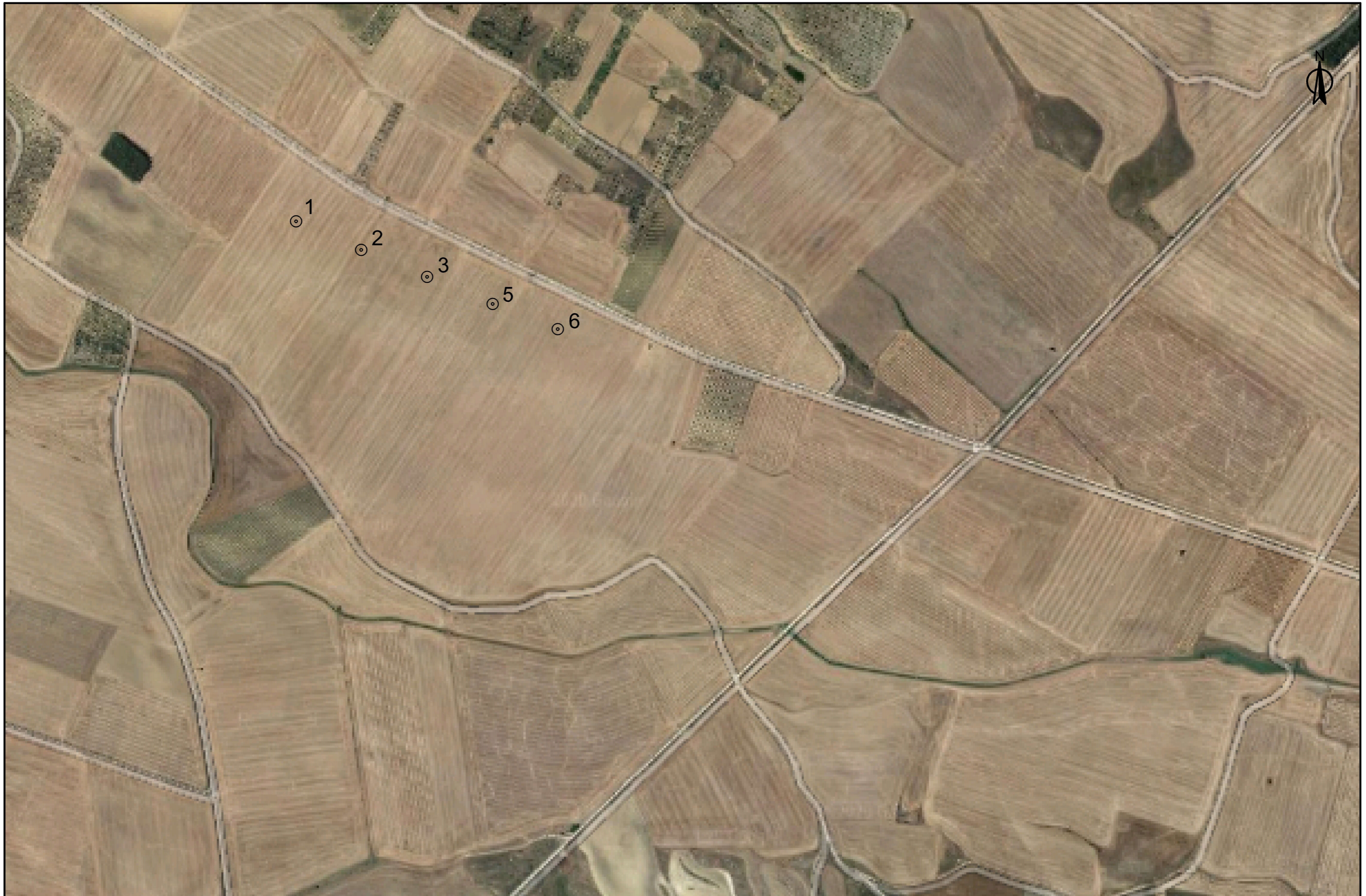
DESIGNACIÓ DEL PLAN  
SITUACIÓ I EMPLAÇAMENT

ESCALA EN UNE-A3  
ASIGNADES

NUMÈRICA

NOMBRE I	COTES EN M
DATA SETEMBRE 2020	





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



Títol

DISSENY GEOTÈCNIC DELS FONAMENTS PER A UN PARC  
EÒLIC A LA COMUNITAT FORAL DE NAVARRA (ESPANYA)

AUTORA

BENAVENT BENAVENT, PATRICIA

TUTOR

MARTÍNEZ IBÁÑEZ, VÍCTOR

DESIGNACIÓ DEL PLAN

SITUACIÓ AEROGENERADORS

ESCALA EN UNE-A3

ESC. 1/5300

NUMÈRICA

NOMBRE

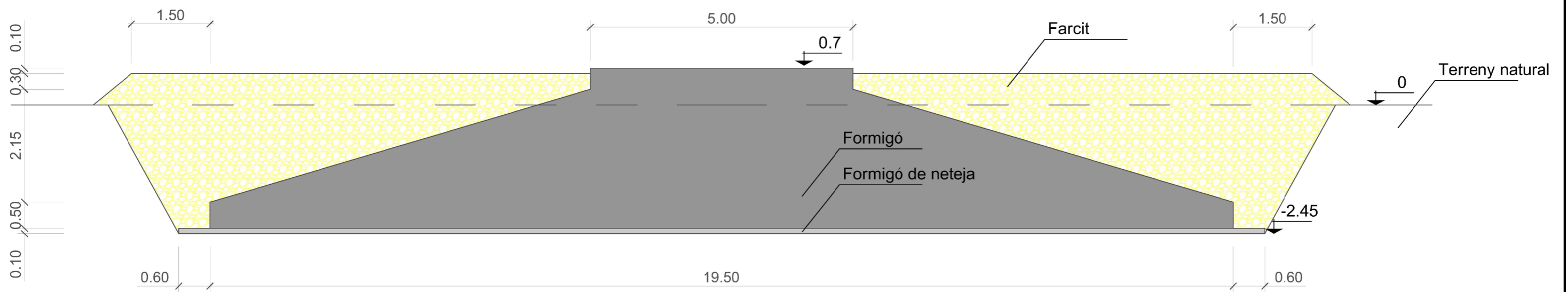
2

COTES EN M

DATA

SETEMBRE 2020





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



Títol

DISSENY GEOTÈCNIC DELS FONAMENTS PER A UN  
PARC EÒLIC A LA COMUNITAT FORAL DE  
NAVARRA (ESPANYA)

AUTORA

BENAVENT BENAVENT, PATRICIA

TUTOR

MARTÍNEZ IBÁÑEZ, VÍCTOR

DESIGNACIÓ DEL PLA  
DETALL SECCIÓ TIPUS

ESCALA EN UNE-A3

ESC. 1/70

NUMÈRICA

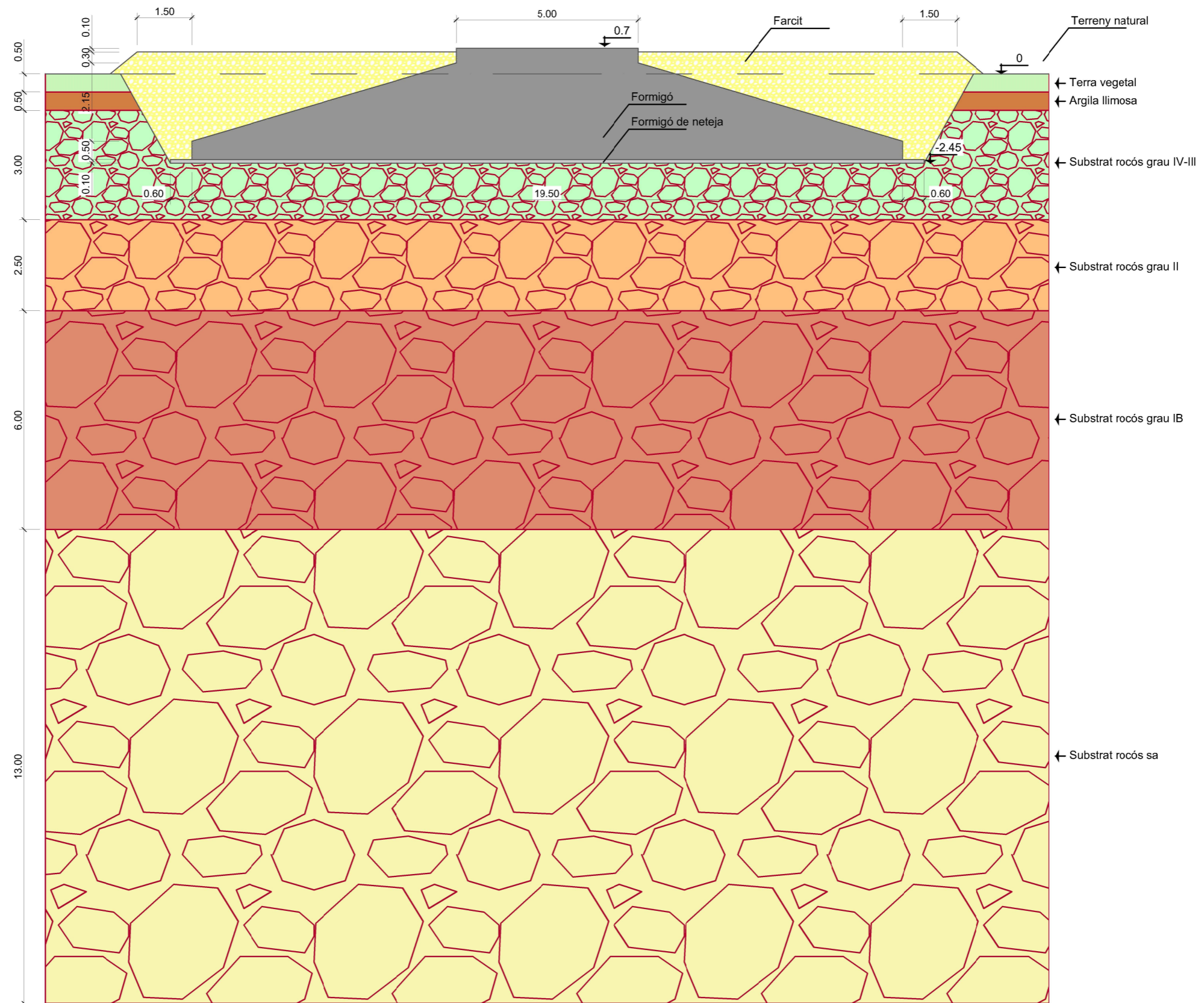
NOMBRE

3

COTES EN M

DATA

SETEMBRE 2020



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



Títol

DISSENY GEOTÈCNIC DELS FONAMENTS PER A UN PARC  
EÒLIC A LA COMUNITAT FORAL DE NAVARRA (ESPANYA)

AUTORA

BENAVENT BENAVENT, PATRICIA

TUTOR

MARTÍNEZ IBÁÑEZ, VÍCTOR

DESIGNACIÓ DEL PLA

SECCIÓ TIPUS AMB EL PERFIL  
LITOLÒGIC

ESCALA EN UNE-A3

ESC. 1/110

NUMÈRICA

NOMBRE

4

COTES EN M

DATA

SETEMBRE 2020



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 3: Valoració econòmica

Màster en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

*Curs: 2019/2020*

*Autora: Benavent Benavent, Patricia*

*Tutor: Martínez Ibáñez, Víctor*

## Índex de figures

<b>Figura 1: Unitats d'obra</b> .....	5
<b>Figura 2: Mesuraments unitat d'obra UO1</b> .....	6
<b>Figura 3: Mesuraments unitat d'obra UO2</b> .....	6
<b>Figura 4: Mesuraments unitat d'obra UO3</b> .....	6
<b>Figura 5: Mesuraments unitat d'obra UO4</b> .....	6
<b>Figura 6: Mesuraments unitat d'obra UO5</b> .....	6
<b>Figura 7: Quadre de preus unitat d'obra UO1</b> .....	7
<b>Figura 8: Quadre de preus unitat d'obra UO2</b> .....	7
<b>Figura 9: Quadre de preus unitat d'obra UO3</b> .....	7
<b>Figura 10: Quadre de preus unitat d'obra UO4</b> .....	7
<b>Figura 11: Quadre de preus unitat d'obra UO5</b> .....	8
<b>Figura 12: Pressupost de les 5 cimentacions dels aerogeneradors</b> .....	9

## ÍNDIX

ÍNDIX DE FIGURES.....	2
1 INTRODUCCIÓ.....	4
2 UNITATS D'OBRA.....	5
3 MESURAMENTS.....	6
4 QUADRE DE PREUS.....	7
5 PRESSUPOST.....	9

## **1 Introducció**

Aquest document recopila les dades referides a la valoració econòmica realitzada a les 5 cimentacions dels aerogeneradors del parc eòlic de la Comunitat Foral de Navarra motiu de la redacció d'aquest treball de fi de Màster.

Cal remarcar que en primer lloc s'han realitzat els càlculs per a un sol fonament i seguidament s'ha multiplicat aquest resultat per a tot el parc eòlic format pels 5 aerogeneradors. D'aquesta manera es podrà comparar econòmicament el disseny realitzat en aquest treball fi de màster amb altres dissenys.

Per a la realització de la valoració econòmica, en primer lloc s'han definit les diferents unitats d'obra que conforma la realització de les 5 cimentacions del aerogeneradors. Posteriorment, es defineix el seu mesurament i se li assigna un preu. Finalment, s'ha elaborat el propi preu incloent els percentatges corresponents a despeses generals, benefici industrial y a l'impost sobre el valor addicionat.

## 2 Unitats d'obra

Les unitats d'obra són cada una de les parts en les que es divideix un estudi amb la finalitat de poder realitzar el seu mesurament i la seua posterior valoració. Per tant, el criteri utilitzat per a la seua elecció ha sigut que aquestes siguen senceres, executables, mesurables i valorables. La unió de totes les unitats d'obra és la cimentació dels aerogeneradors.

Font: Elaboració pròpia

UNITATS D'OBRA		
CODI	UNITAT DE MESURAMENT	DEFINICIÓ
UO1	m3	Formigó en massa en la sabata
UO2	m3	Formigó de neteja
UO3	m3	Farcit
UO4	m3	Excavació terreny natural
UO5	m3	Transport terreny. Distància màxima 5 km

Figura 1: Unitats d'obra



### 3 Mesuraments

Font: Elaboració pròpia

Formigó en massa en la sabata

Codi	Unitat	Descripció	Volum (m <sup>3</sup> )
UO1	m <sup>3</sup>	Formigó referit a l'altura H3+H4	7,85
		Formigó referit a l'altura H2	283,00
		Formigó referit a l'altura H1	149,00
		<b>TOTAL</b>	<b>439,85</b>

Figura 2: Mesuraments unitat d'obra UO1

Font: Elaboració pròpia

Formigó de neteja

Codi	Unitat	Descripció	Volum (m <sup>3</sup> )
UO2	m <sup>3</sup>	Llosa	33,90
		<b>TOTAL</b>	<b>33,90</b>

Figura 3: Mesuraments unitat d'obra UO2

Font: Elaboració pròpia

Farcit

Codi	Unitat	Descripció	Volum (m <sup>3</sup> )
UO3	m <sup>3</sup>	Sobre el nivell natural del terreny	278,10
		Baix el nivell natural del terreny	503,10
		<b>TOTAL</b>	<b>781,20</b>

Figura 4: Mesuraments unitat d'obra UO3

Font: Elaboració pròpia

Excavació terreny natural

Codi	Unitat	Descripció	Volum (m <sup>3</sup> )
UO4	m <sup>3</sup>	Excavació terreny	961,50
		<b>TOTAL</b>	<b>961,50</b>

Figura 5: Mesuraments unitat d'obra UO4

Font: Elaboració pròpia

Excavació terreny natural

Codi	Unitat	Descripció	Volum (m <sup>3</sup> )
UO4	m <sup>3</sup>	Excavació terreny	961,50
		<b>TOTAL</b>	<b>961,50</b>

Figura 6: Mesuraments unitat d'obra UO5

#### 4 Quadre de preus

En els següents quadres de preus s'ha exposat els preus d'execució material de les diferents unitats d'obres existents en el present estudi, indicats en lletra i número per a reduir la possibilitat d'error. A més a més, s'ha inclòs un codi, la unitat de mesurament i la definició de la unitat.

Font: Elaboració pròpia

PREU UNITARI						UO1
m <sup>3</sup> Formigó en massa en la sabata						
CODI	UD	UNITAT	DEFINICIÓ	DESPESES(€/UD)	PARCIAL	TOTAL
MT001	1.00	m <sup>3</sup>	Formigó	60,00	60,00	60,00
SUMA DE DESPESES DIRECTES						60,00
SUMA DE DESPESES INDIRECTES (6%/despesa directa)						3,60
<b>TOTAL PREU DE EXECUSSIÓ MATERIAL</b>						<b>63,60</b>

UO1 m<sup>3</sup> Formigó en massa en la sabata

Són SEIXANTA TRES EUROS AMB SEIXANTA CÈNTIMS .....63,63 €

Figura 7: Quadre de preus unitat d'obra UO1

Font: Elaboració pròpia

PREU UNITARI						UO2
m <sup>3</sup> Formigó de neteja						
CODI	UD	UNITAT	DEFINICIÓ	DESPESES(€/UD)	PARCIAL	TOTAL
MT002	1.00	m <sup>3</sup>	Formigó	50,00	50,00	50,00
SUMA DE DESPESES DIRECTES						50,00
SUMA DE DESPESES INDIRECTES (6%/despesa directa)						3,00
<b>TOTAL PREU DE EXECUSSIÓ MATERIAL</b>						<b>53,00</b>

UO2 m<sup>3</sup> Formigó de neteja

Són CINQUANTA TRES EUROS .....53,00 €

Figura 8: Quadre de preus unitat d'obra UO2

Font: Elaboració pròpia

PREU UNITARI						UO3
m <sup>3</sup> Farcit						
CODI	UD	UNITAT	DEFINICIÓ	DESPESES(€/UD)	PARCIAL	TOTAL
MT003	1.00	m <sup>3</sup>	Farcit	6,50	6,50	6,50
SUMA DE DESPESES DIRECTES						6,50
SUMA DE DESPESES INDIRECTES (6%/despesa directa)						0,39
<b>TOTAL PREU DE EXECUSSIÓ MATERIAL</b>						<b>6,89</b>

UO3 m<sup>3</sup> Farcit

Són SIS EUROS AMB HUITANTA NOU CÈNTIMS .....6,89 €

Figura 9: Quadre de preus unitat d'obra UO3

Font: Elaboració pròpia

PREU UNITARI						UO4
m <sup>3</sup> Excavació terreny natural						
CODI	UD	UNITAT	DEFINICIÓ	DESPESES(€/UD)	PARCIAL	TOTAL
MT004	1.00	m <sup>3</sup>	Terreny natural	4,76	4,76	4,76
SUMA DE DESPESES DIRECTES						4,76
SUMA DE DESPESES INDIRECTES (6%/despesa directa)						0,29
<b>TOTAL PREU DE EXECUSSIÓ MATERIAL</b>						<b>5,05</b>

UO4 m<sup>3</sup> Excavació terreny natural

Són CINC EUROS AMB CINC CÈNTIMS .....5,05 €

Figura 10: Quadre de preus unitat d'obra UO4

Font: Elaboració pròpia

PREU UNITARI						UO4
m <sup>3</sup> Transport terreny. Distància màxima 5 km						
CODI	UD	UNITAT	DEFINICIÓ	DESPESA(€/UD)	PARCIAL	TOTAL
MT005	1.00	m <sup>3</sup>	Terreny natural	2,34	2,34	2,34
SUMA DE DESPESES DIRECTES						2,34
SUMA DE DESPESES INDIRECTES (6%/despesa directa)						0,14
<b>TOTAL PREU DE EXECUSSIÓ MATERIAL</b>						<b>2,48</b>

UO5 m<sup>3</sup> Transport terreny. Distància màxima 5 km

Són DOS EUROS AMB QUARANTA HUI CÈNTIMS.....5,05 €

Figura 11: Quadre de preus unitat d'obra UO5

## 5 Pressupost

Amb acordança amb els preus i mesuraments realitzats en el present document, s'ha aconseguit el pressupost d'execució del material. El seu resum s'adjunta a continuació.

A més a més, s'ha inclòs percentatges respecte les despeses generals (13%), benefici industrial (6%) i l'impost sobre el valor addicional (21%). D'aquest mode, s'ha realitzat també el pressupost de base de licitació estimat d'obra civil executada.

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
Transport terreny. Distància màxima 5 km	2.384,52	€	5,62
<b>PRESSUPOST D'EXECUCIÓ MATERIAL</b>	<b>42.393,72</b>	<b>€</b>	
<b>PRESSUPOST 5 FONAMENTS (P5F)</b>	<b>211.968,62</b>	<b>€</b>	
13% Despeses generals (s/P5F)	27.555,92	€	
6% Benefici indústria (s/P5F)	12.718,12	€	
<b>PRESSUPOST BASE DE LICITACIÓ SENSE IVA</b>	<b>252.242,65</b>	<b>€</b>	

	IMPORT	Ud.
I.V.A: 21% (s/P5F+GG+BI)	52.970,96	€

<b>PRESSUPOST BASE DE LICITACIÓ</b>	<b>305.213,61</b>	<b>€</b>
-------------------------------------	-------------------	----------

Figura 12: Pressupost de les 5 cimentacions dels aerogeneradors

Ascendeix el pressupost a la expressada quantitat de TRES CENTS CINC MIL DOS CENTS TRETZE EUROS AMB SEIXANT UN CÈNTIMS (305.213,61 €) .

SETEMBRE 2020