

TREBALL FI DE CARRERA

Títol

Anàlisi d'assaigs de penetració estàtica i de mesura de deformacions en sòls tous: aplicació al Delta del Llobregat.

Autor/a

Jesús Estévez Soler.

Tutor/a

Antonio Lloret Morancho.

Departament

Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica.

Intensificació

Data

Maig – Juny 2012.

Agraïments.

Aquesta llista podria ser molt extensa ja que, amb el temps, hi ha hagut molta gent que ha aportat quelcom a aquesta tesina, molt sovint suport i ànims, i seria molt feixuc esmentar-los a tots. Són gent del meu poble o que he conegut treballant o fent altres coses però sempre bons amics i companys. El meu reconeixement ja el tenen, malgrat no els esmenti.

Les mencions a la gent que cal destacar:

En primer lloc, al meu tutor, el professor Antoni Lloret, per tenir més paciència que el Sant Job i la bonhomia de recuperar aquesta tesina després d'uns quants anys.

Seguidament, uns quants companys de la carrera i de l'escola, molt especialment en Ferran Roig i l'Enric Ibàñez (molt més que uns companys, grans amics), en Raúl de Miguel, l'Arturo, en Gerard, en Javi López, en Rafa i molts d'altres que em deixo.

Molt especialment, a José Luis Aldecoa i la seva dona, la Marga, pel suport i la confiança que sempre m'han demostrat.

Finalment, als meus pares i germans per esperar llargament aquest moment (a vegades amb poca paciència però que hi farem) que, finalment, ha arribat.

A tots, moltes gràcies!!!!

Resum.

Durant els darrers anys s'han desenvolupat de manera molt eficient tota mena d'assaigs in situ que permeten una caracterització del sòl, tant pel que fa a la identificació dels diferents materials que el formen com a la determinació dels paràmetres que defineixen el seu comportament, de manera ràpida i fiable.

En el cas d'aquesta tesina, s'analitza una millora de terreny mitjantçant una precàrrega a la zona on es va construir l'estació depuradora d'aigües residuals d'El Prat de Llobregat (EDAR Llobregat) que està situada sobre el delta del riu Llobregat.

Donat que els terrenys deltaics no són materials amb bones propietats resistents, prèviament a la construcció es van realitzar una sèrie de reconeixements geològic amb sondeigs amb recuperació de mostra i assaigs de penetració estàtica, tant CPT com CPTu, per fer una caracterització del sòl.

Agafant com a base aquests assaigs de reconeixement, en aquest treball es realitza la caracterització del terreny i dels seus paràmetres característics que se'n poden despendre, a partir de correlacions empíriques.

Un cop fixat el model de terreny i, donat que es coneixia la deformació (assentament) que es produïa durant la prova de precàrrega a partir d'uns extensòmetres lliscants, es pretèn caracteritzar el terreny fent servir un retroanàlisi. La intenció és comparar la validesa d'aquest procediment per poder estendre aquest model a la totalitat de la precàrrega realitzada.

Abstract.

Keywords: on site testing, soil classification, CPT, CPTu, settlement, parameters, back-analysis.

In recent years we have developed very efficiently all kinds of on site tests that allow characterization of soil, both for the identification of different materials that form as the determination of the parameters that define the behavior, quickly and reliably.

In the case of this minor thesis, we analyze an improved ground by a preload in the area where the station was built the wastewater treatment plant from El Prat de Llobregat(EDAR Llobregat), that is located on the delta of the Llobregat river.

Since the delta lands are not materials with good resistant properties, the building was previously a series of geological probes, including boreholes with sample recovery and static - cone penetration tests, such as CPT and CPTu, for soil characterization.

Taking these tests as a basis for recognition, this work is carried out to characterize the soil and its characteristic parameters that they can come off, based on empirical correlations.

Once set the model of soil and, given what was known deformation (settlement) that occurs during the test of preload from a sliding extensometers, it aims to characterize the ground using a back-analysis. The intention is to compare the validity of this procedure to extend this model to the entire preload made.

Índex de figures.

Figura 3 – 1. Localització geogràfica de la EDAR (La Vanguardia).

Figura 3 – 2. Planta de l'EDAR.

Figura 3 – 3. Mapa geològic de la zona d'estudi (Ventayol, 2004)..

Figura 3 – 4. Tall geològic de la zona d'estudi (Ventayol, 2004).

Figura 3 – 5. Tall esquemàtic de la situació geològica i hidrogeològica de la zona d'estudi de la precàrrega de millora del terreny (Alonso, E.E. et al, 1997).

Figura 3 – 6. Situació hidrogeològica del Delta del Llobregat (Institut Cartogràfic de Catalunya, Institut Geològic de Catalunya, 2006).

Figura 3 – 7. Representació de les diferents pressions d'aigua que han actuat al terreny al llarg del temps.

Figura 4 – 1. Situació dels assaigs de penetració estàtica (entre d'altres) a la zona test de la precàrrega (Alonso, E. E. et al, 1997).

Figura 4 – 2. Situació dels assaigs de penetració estàtica a la EDAR (Alonso, E. E. et al, 1997).

Figura 4 – 3. Esquema de la punta cònica d'un penetròmetre estàtic, en aquest cas un CPTu, amb la disposició dels diferents elements que la formen (Chen, B.S-Y, Mayne, P.W., 1994)..

Figura 4 – 4. Relació de les àrees dels elements del CPTu que intervenen en el càlcul del paràmetre a (Lunne et al., 1997).

Figura 4 – 5. CPTu 2. Perfils de resistència en punta q_c (MPa), coeficient de fregament R_f (%) i pressió de porus u_2 (MPa) en funció de la profunditat (m).

Figura 4 – 6. CPTu 4. Perfils de resistència en punta q_c (MPa), coeficient de fregament R_f (%) i pressió de porus u_2 (MPa) en funció de la profunditat (m).

Figura 4 – 7. CPT 3. Perfils de la resistència en punta q_c (MPa) i del coeficient de fregament R_f (%) amb la profunditat (m).

Figura 4 – 8. Classificació de Douglas i Olsen (Douglas i Olsen, 1981).

Figura 4 – 9. Resultat de la classificació de Douglas i Olsen aplicada als assaigs de la zona test.

Figura 4 – 10. Taula resum de la classificació de Senneset, Sandven i Janbu (Senneset et al., 1984).

Figura 4 – 11. Resultats de la classificació de Senneset, Sandven i Janbu a la zona test.

Figura 4 – 12. Taula resum de la classificació de Robertson (Robertson et al., 1986).

Figura 4 – 13. Resultats de la classificació de Robertson a la zona test (Robertson et al., 1986).

Figura 4 – 14. Taula resum de la classificació de Robertson (Robertson, 1990).

Figura 4 – 15. Resultats obtinguts amb la classificació de Robertson a la zona test (Robertson, 1990).

Figura 4 – 16. Classificació del sòl a partir de dades del CPTu segons Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991).

Figura 4 – 17. Resultats obtinguts amb la classificació de Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991). a la zona test.

Figura 4 – 18. Resultat de la correlació amb la sensibilitat

Figura 4 – 19. Valors màxims i mínims de C_c segons la relació de Sanglerat (1972). Per poder utilitzar aquesta correlació, cal treballar amb q_c en kp/cm^2 no en MPa.

Figura 4 – 20. Variació del mòdul edomètric, E_m , amb la profunditat als CPTu 2 i CPTu 4.

Figura 4 – 21. Correlació de les dades del CPTu amb la pressió de preconsolidació.

Figura 4 – 22. Representació de la variació de B_q amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Figura 4 – 23. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_1 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Figura 4 – 24. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_2 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Figura 4 – 25. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_3 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Figura 4 – 26. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_4 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Índexs de figures i taules.

Figura 4 – 27. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_5 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Figura 4 – 28. Esquema del extensòmetre lliscant. Components i posicions de lectura (Dunncliff, 1988).

Figura 4 – 29. Resultats del extensòmetre lliscant M04 de la zona test de la precàrrega (Eurogeotècnia, 1999).

Figura 5 - 1. Correlació entre l'OCR i el coeficient de consolidació secundària ca realitzada a partir d'assaigs edomètrics (Alonso,E.E. et al, 1999).

Figura 5 - 1. Distribució de les tensions verticals a la zona test extrems d'una anàlisi amb elements finits (Alonso,E.E. et al, 1999).

Figura 5 - 2. Distribució de l'increment de la tensió vertical total produït per efecte de la sobrecàrrega a diferents punts de la zona test.

Figura 5 - 4. Esquema de l'evolució temporal de la pressió d'aigua i de la tensió efectiva al nivell argilós intermedi.

Figura 5 - 5. Variació de l'OCR amb la profunditat segons la sobrecàrrega aplicada.

Figura 5 - 6. Determinació de les diferents fases de la precàrrega a partir del control realitzat durant el procés (Eurogeotècnia, 1999).

Figura 5 - 7 . Esquema del funcionament del programa desenvolupat per a l'ajust dels paràmetres del terreny. En negreta, les dades bàsiques necessàries per a la generació i resolució del sistema.

Figura 5 -8. Comparació entre les dades reals de deformació i les deformacions filtrades que utilitzem per a fer l'ajust. Correspon al micròmetre 2Dx3, proper al CPTu 19.

Figura 5 - 9. Variació de α_{s1} amb les iteracions.

Figura 5 - 10. Variació de α_{s2} amb les iteracions.

Figura 5 - 11. Variació de α_{lim} amb les iteracions.

Figura 5 - 12. Variació de C_c amb les iteracions.

Figura 5 - 13. Variació de C_s amb les iteracions.

Figura 5 - 14. Variació de C_v amb les iteracions.

Figura 5 - 15. Variació de a amb les iteracions.

Figura 5 - 16. Variació de b amb les iteracions.

Figura 5 - 17. Variació de c_a amb les iteracions.

Figura 5 - 18. Variació de $C_{\square s1}$ amb les iteracions.

Figura 5 - 19. Variació de $C_{\square s2}$ amb les iteracions.

Figura 5 - 20. Variació de $C_{\square lim}$ amb les iteracions.

Figura 5 - 21. Variació de l'error total comès amb les iteracions.

Figura 5 - 22. Estudi de la variació del valor inicial de c_v i de l'error comès.

Figura 5 - 23. CPTu 18. Comparació entre les dades reals i les calculades amb l'ajust per a dues fases temporals diferents.

Figura 5 - 24. CPTu 2. Comparació entre les dades reals i les calculades amb l'ajust per a dues fases temporals diferents.

Índex de taules.

- Taula 4 – 1.** Relació dels assaigs de penetració estàtica disponibles.
- Taula 4 – 2.** Criteris de classificació de materials a partir de les dades dels CPT – CPTu.
- Taula 4 – 3.** Criteris per a la classificació dels materials
- Taula 4 – 4.** Valors de la resistència en punta inicial, q_{co} , i del gradient de la resistència en punta, ∇q_c , de la recta que determina el nivell de base de la resistència en punta per als assaigs de la zona test.
- Taula 4 – 5.** Valors del coeficient de fregament R_f que es considera com a separació entre els materials cohesius i els granulars per als assaigs de la zona test.
- Taula 4 – 6.** Resum de la classificació de Douglas i Olsen a la zona test.
- Taula 4 – 7.** Resultats obtinguts amb la classificació del terrenys de Senneset, Sandven i Janbu (Senneset et al., 1984)
- Taula 4 – 8.** Tipus de sòls (SBT) definits a la classificació de Robertson (1986).
- Taula 4 – 9.** Resultats obtinguts amb la classificació de Robertson (Robertson et al., 1986).
- Taula 4 – 10.** Tipus de sòls (SBT) definits a la classificació de Robertson (Robertson, 1990).
- Taula 4 – 11.** Resultats obtinguts amb la classificació de Robertson (Robertson, 1990).
- Taula 4 – 12.** Tipus de sòl definits a la classificació de Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991).
- Taula 4 – 13.** Resultats obtinguts amb la classificació de Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991).
- Taula 4 – 14.** Definició dels nivells de sensibilitat.
- Taula 4 – 15.** Valors obtinguts amb la correlació de la sensibilitat.
- Taula 4 – 16.** Influència del valor de R_f en el càlcul de la sensibilitat, S_t .
- Taula 4 – 17.** Valors obtinguts amb la correlació de l'índex de compressibilitat (valors màxims i mínims).
- Taula 4 – 18.** Valors obtinguts amb la correlació del mòdul edomètric, en MPa.
- Taula 4 – 19.** Valors obtinguts amb la correlació de la pressió de preconsolidació, en MPa.
- Taula 4 – 20.** Correlacions de l'OCR amb dades dels assaigs de penetració estàtica que s'han utilitzat.
- Taula 4 – 21.** Condicions de validesa de les correlacions utilitzades.
- Taula 4 – 22.** Punts on són vàlides les correlacions anteriors i resultats obtinguts (valor mig i mediana).
- Taula 4 – 23.** Criteris per a la classificació dels materials.
- Taula 4 – 24.** Resultat de la classificació de materials per al CPTu 2.
- Taula 4 – 25.** Resultat de la classificació de materials per al CPTu 4.
- Taula 4 – 26.** Resultat de la classificació de materials per al CPT 3.
- Taula 4 – 27.** Relació dels micròmetres utilitzats, profunditat assolida i assaigs de penetració amb el qual es relacionen.
- Taula 5 – 1.** Paràmetres dels materials drenants – elàstics.
- Taula 5 – 1.** Llistat dels paràmetres inicials que intervenen al model de terreny considerat.
- Taula 5 – 2.** Llistat de la totalitat de paràmetres que intervenen al model de terreny considerat.
- Taula 5 – 3.** Llistat dels arxius bàsics que demana el programa.
- Taula 5 – 4.** Llistat de les dades que demana el programa.
- Taula 5 – 5.** Valors dels paràmetres considerats en els càlculs d'assentaments de la comprovació.
- Taula 5 – 6.** Paràmetres obtinguts amb la comprovació.
- Taula 5 – 7.** Paràmetres obtinguts amb la comprovació Paràmetres_1.
- Taula 5 – 8.** Paràmetres obtinguts amb la comprovació Paràmetres_2.
- Taula 5 – 9.** Resum de les propietats de les diferents situacions de càlcul estudiades.
- Taula 5 – 10.** Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 2.
- Taula 5 – 11.** Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 4.

Índexs de figures i taules.

Taula 5 – 12. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPT 3.

Taula 5 – 13. Valors dels paràmetres obtinguts.

Taula 5 – 14. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 18.

Taula 5 – 15. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 19.

Taula 5 – 16. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 36.

Taula 5 – 17. Error comès amb variacions de l'alçada del terraplè de precàrrega.

Taula 5 – 18. Valors dels paràmetres obtinguts.

Taula 5 – 19. Resum dels resultats obtinguts.

Taula 6 – 1. Resum dels paràmetres obtinguts amb les correlacions.

Taula 6 – 2. Resum dels paràmetres calculats.

0 ÍNDEX

A RESUM.

B ÍNDEXS DE FIGURES I TAULES.

<i>Índex de figures.</i>	III
<i>Índex de taules.</i>	V

0 ÍNDEX VII

1 INTRODUCCIÓ 1

2 OBJECTIUS I METODOLOGIA..... 3

3 DESCRIPCIÓ DEL PROBLEMA. 5

3.1 <i>Situació geogràfica.</i>	5
3.2 <i>Context geològic i hidrogeològic.</i>	6

4 ANTECEDENTS, RECOPIACIÓ I ESTUDI DE LES DADES PER A LA CARACTERITZACIÓ DEL TERRENY..... 11

4.1 <i>Antecedents i recopilació de dades.</i>	11
4.2 <i>Bases dels assaigs de penetració estàtica.</i>	15
4.3 <i>Terminologia utilitzada en els assaigs de penetració estàtica.</i>	16
4.4 <i>Anàlisi de les dades.</i>	19
4.4.1 <i>Dades bàsiques.</i>	19
4.4.2 <i>Classificació del terreny estudiat.</i>	25
4.4.2.1 <i>Classificació de Douglas i Olsen.</i>	26
4.4.2.2 <i>Classificació de Senneset, Sandven i Janbu.</i>	29
4.4.2.3 <i>Classificació de Robertson (1986).</i>	31
4.4.2.4 <i>Classificació de Robertson (1990).</i>	34
4.4.2.5 <i>Classificació de Jefferies i Davies.</i>	37
4.4.3 <i>Correlacions amb paràmetres del terreny.</i>	39
4.4.3.1 <i>Sensitivitat de les argiles (S_t).</i>	40
4.4.3.2 <i>Índex de compressibilitat (C_c).</i>	43
4.4.3.3 <i>Mòdul edomètric (E_m).</i>	46
4.4.3.4 <i>Pressió de preconsolidació (p'_c).</i>	48
4.4.3.5 <i>Correlacions amb el grau de sobreconsolidació (OCR).</i>	50
4.5 <i>Proposta de classificació dels materials del Delta del Llobregat.</i>	58
4.5.1 <i>Resultats del CPT 3.</i>	58
4.5.2 <i>Resultats del CPTu 2.</i>	58
4.5.3 <i>Resultats del CPTu 4.</i>	59
4.5.4 <i>Resum de la zona test de la precàrrega.</i>	59
4.5 <i>Obtenció de les dades de deformació del terreny</i>	63
4.5.1 <i>Descripció del extensòmetre lliscant.</i>	63
4.5.2 <i>Procés de mesura.</i>	63
4.5.3 <i>Profunditats de mesura.</i>	64
4.5.4 <i>Resultats de la mesura.</i>	64
4.5.5 <i>Exactitud.</i>	64
4.5.6 <i>Anàlisi de les dades del extensòmetres.</i>	64

Índex.

5	ESTUDI CONJUNT DELS ASSAIGS DE PENETRACIÓ ESTÀTICA I DE LES DEFORMACIONS DEL TERRENY.	67
5.1	<i>Metodologia de càlcul</i>	68
5.1.1	<i>Mètode dels mínims quadrats</i>	68
5.1.2	<i>Paràmetres del terreny i equacions de deformació</i>	70
5.1.3	<i>Distribució de les sobrecàrregues al terreny</i>	75
5.1.4	<i>Condicions hidrogeològiques del terreny</i>	77
5.2	<i>Funcionament del programa desenvolupat</i>	80
5.2.1	<i>Consideracions importants</i>	83
5.2.2	<i>Comprovació del funcionament del programa</i>	84
5.3	<i>Resultats obtinguts amb dades reals</i>	96
5.3.1	<i>Dades de la zona test</i>	96
5.3.2	<i>Resultats amb altres assaigs</i>	99
5.4	<i>Comentaris finals</i>	100
6	CONCLUSIONS	101
6.1	<i>Classificació del sòl amb les dades dels assaigs de penetració estàtica</i>	101
6.2	<i>Correlacions amb les dades dels assaigs de penetració estàtica</i>	102
6.3	<i>Resultats obtinguts amb l'ajust per mínims quadrats</i>	103
6.4	<i>Conclusions finals</i>	104
7	BIBLIOGRAFIA	105
8	ANNEXES	107
8.1	<i>Annex A: Llistat del programa</i>	107

1 Introducció

Els deltes actuals de la Mediterrània han estat, des de sempre, llocs d'ample ús agrícola a causa de l'elevada fertilitat del terreny i la fàcil disponibilitat d'aigua. Durant el segle XX, l'entorn deltaic proper a grans ciutats, com ara el cas de Barcelona, ha estat progressivament ocupat per activitats industrials i infraestructures vàries han desplaçat els conreus, substituint-los per polígons industrials, xarxes viàries, aeroports...

En el cas del delta del riu Llobregat, i sota un punt de vista geotècnic, es combina la mediocre qualitat del terreny amb una important implantació constructiva, que en el cas de la riba esquerra del delta és pràcticament absoluta.

La baixa qualitat del terreny d'aquesta àrea deltaica provoca que el comportament del sòl condioni molt a les estructures que ha de suportar, no tant per les càrregues que poden transmetre-li com per les deformacions verticals (assentaments) que puguin patir, ja siguin totals o diferencials.

A més a més, cal afegir una situació hidrogeològica complicada per l'ús que n'ha fet l'home dels recursos hídrics. Èpoques durant les què s'ha extret molta quantitat d'aigua han modificat completament el comportament deformacional del terreny.

Amb tots aquests condicionants, l'any 1996 comencen una sèrie de tasques que s'acaben l'any 2002 amb la finalització de les obres de l'Estació Depuradora del Baix Llobregat, anomenada EDAR Llobregat.

Una part molt important de les tasques inicials que es van dur a terme va consistir a l'estudi dels efectes d'una millora del terreny per consolidació mitjançant una precàrrega de gran extensió.

Per fer-ho, en primer lloc es va realitzar una campanya de reconeixement del terreny amb sondeigs i assaigs de penetració estàtica amb la intenció de fer una caracterització molt acurada de la columna de material afectada per la precàrrega. Donada la poca resistència del sòl a travessar, es realitzen una gran quantitat d'assaigs de penetració estàtica per la rapidesa d'execució i per la quantitat d'informació que proporcionen. Es caracteritza la totalitat de l'àrea que ocuparà l'EDAR.

Posteriorment, es va realitzar una precàrrega en una àrea més petita que va ser controlada durant més de dos anys. Els principals paràmetres controlats van ser les deformacions verticals provocades per la sobrecàrrega aplicada, que es mesuren amb uns extensòmetres lliscants instal·lats al terraplè i a d'altres parts de l'EDAR.

A partir de la comparació entre les dades obtingudes amb els assaigs de penetració estàtica i de les mesures de deformació es busca una manera, més o menys automàtica, de classificar el terreny i de determinar els seus principals paràmetres deformacionals. Per a fer-ho cal establir un criteri de classificació del sòl i d'ajust de paràmetres.

Aquesta caracterització dels materials i càlcul dels paràmetres es realitza a la zona test de la precàrrega, ja que és la zona on es té més informació i on és més fàcil determinar la validesa de la metodologia emprada.

La intenció, però, no és limitar-se a la zona test; un cop comprovats els resultats obtinguts a la zona test, es procedirà a estendre l'estudi a la resta d'assaigs de penetració estàtica repartits per tota la superfície de la EDAR i, finalment, fer una predicció dels assentaments que es poden esperar.

2 Objectius i metodologia.

Tal i com ja s'ha esmentat al capítol anterior, l'objectiu és trobar una manera ràpida de classificar el terreny partint de les dades dels assaigs de penetració estàtica. Amb la caracterització dels materials que es faci i relacionant-la amb les deformacions mesurades pels extensòmetres lliscants.

Per fer-ho disposem de les dades dels assaigs de penetració estàtica fets a tota l'àrea de l'EDAR i de les dades de deformació mesurades a la zona test de la prècarrega i fóra d'ella.

En primer lloc, es realitza una caracterització del sòl directament de les dades dels assaigs de penetració estàtica. Per una banda es realitza una classificació de la columna de terreny partint de taules de classificació proposades per diversos autors. Per altra banda, es determinen alguns paràmetres característics del terreny utilitzant correlacions empíriques que utilitzen les dades dels CPT i CPTu.

Els resultats obtinguts es comparen amb resultats d'assaig de laboratori per comparar-ne la bondat.

Seguidament, un cop caracteritzat el terreny, es relaciona la columna de sòl amb les dades de deformació proporcionades pels extensòmetres lliscants. Això es fa amb un programa desenvolupat amb FORTRAN. A partir d'un model de comportament del sòl i amb l'ajuda d'aquest programa es determinen tota una sèrie de paràmetres resistents del mateix. Els paràmetres que s'obtenen com a resultat són els que minimitzen les diferències entre les dades d'assentaments mesurades, és a dir la deformació real, i la deformació calculada fent servir el model numèric.

Per fer-ho, s'estudia la evolució de les pressions totals i efectives del terreny per fixar el seu comportament. Les tensions efectives són especialment complexes perquè depenen de la pressió d'aigua i, com ja s'ha comentat abans, aquestes han sigut molt variables al llarg del temps.

Ara bé, el comportament deformacional del terreny també depèn de l'evolució temporal de la precàrrega aplicada per tal de millorar el terreny i del valor de la sobrecàrrega aplicada perquè l'efecte de la sobrecàrrega també modifica la distribució de les tensions efectives del terreny i, consegüentment, el comportament deformacional del sòl.

És adir, no només hem de tenir un bon model del sòl sinó que ens cal un bon coneixement de la història de les pressions d'aigua i de la sobrecàrrega de millora del terreny per a fer la determinació dels paràmetres.

Totes aquestes variables estan recollides dintre del llistat del programa, que es troba als annexes d'aquest treball.

3 Descripció del problema.

3.1 Situació geogràfica.

L'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR) del Llobregat està situada a la riba esquerra del riu Llobregat (en direcció aigües avall) al terme municipal de El Prat de Llobregat (Barcelona), molt a prop de la desembocadura del riu (figura 3-1).

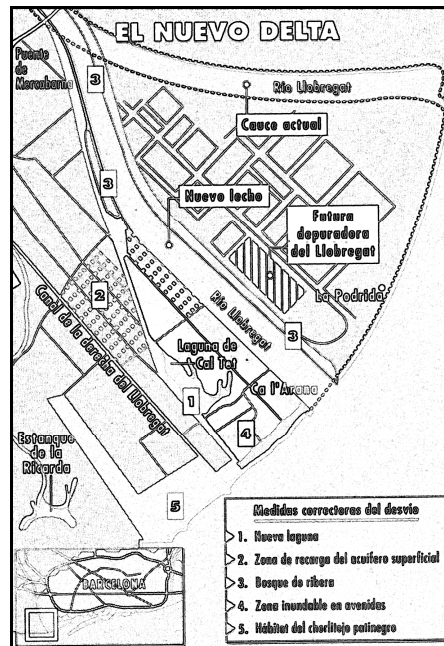


Figura 3-1. Localització geogràfica de la EDAR (La Vanguardia).

La planta de l'EDAR està en una àmplia zona de més de 300 m d'amplada per 1700 m de longitud, cobrint una àrea de més de 42 Ha (figura 3-2).

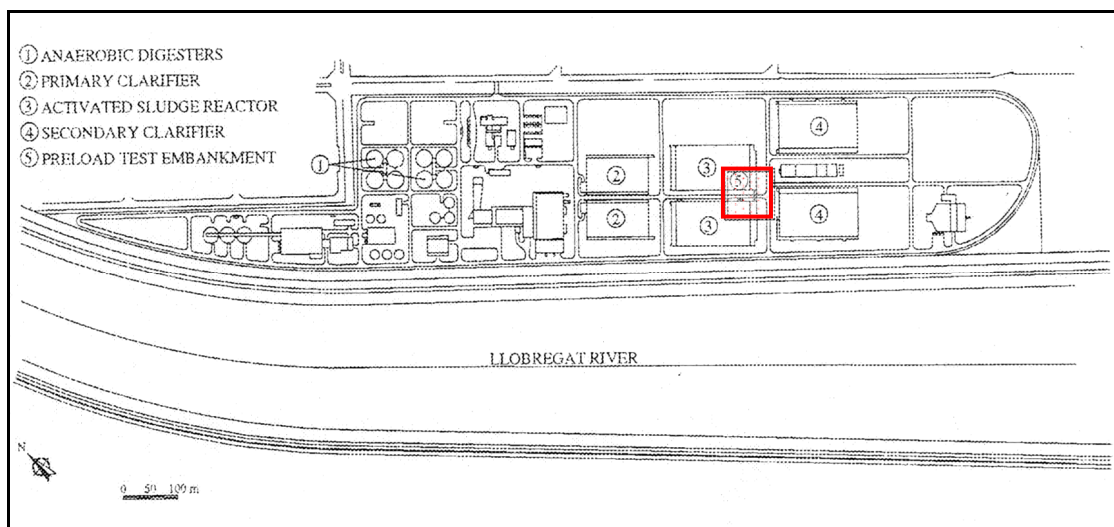


Figura 3-2. Planta de l'EDAR, amb la posició de la zona test de la precàrrega indicada en vermell (Aloso, E.E. et al, 1997).

Descripció del problema.

3.2 Context geològic i hidrogeològic

La planura deltaica del Llobregat està situada al sud-oest de Barcelona. La seva morfologia és molt suau, amb pendents inferiors al 1%, situant-se gairebé sempre per sota dels 12 metres sobre el nivell del mar.

El delta va avançar sobre el mar fins a primers del segle XX però en l'actualitat dominen els processos d'erosió marina en alguns sectors. Això és degut a una reducció en l'aportació de sediments pel riu, ja que gran part queden retinguts en preses, i també en un menor cabal d'aigua que arriba al mar.

Els deltes actuals del Mediterrani són estructures geològiques molt recents ja que són posteriors al darrer procés glacial, que finalitzà fa uns 15.000 anys. Els sediments que els formen tenen una potència relativament important que pot superar els 70 metres, i donada la seva poca edat, són dipòsits generalment poc compactes, en els què sovint es combina una baixa capacitat resistent i una significativa deformabilitat.

L'EDAR estarà situada sobre els materials que conformen aquest delta, bàsicament materials sedimentaris detrítics (veure figura 3-3).

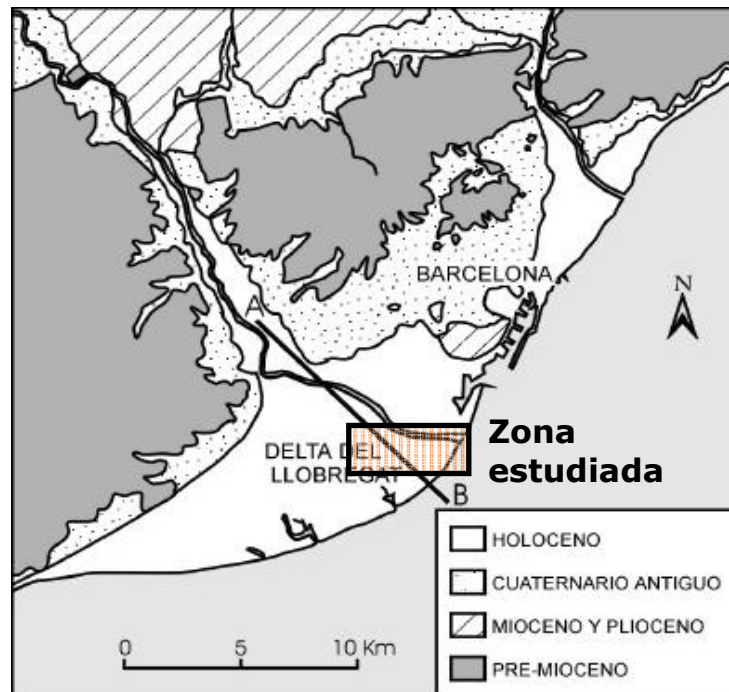


Figura 3-3. Mapa geològic de la zona d'estudi (Ventayol, 2004).

Tots aquests materials són d'edat Quaternària (Holocè) i formen part d'una gran unitat geomorfològica que és el delta del Llobregat. Aquesta gran unitat ocupa una extensa plana de prop de 100 km² que, geogràficament, s'estén des de l'estret de Cornellà – Sant Boi fins al mar. Tal i com s'aprecia és molt més gran el lòbul dret del delta que l'esquerre.

A través de diferents sondeigs realitzats, s'ha pogut comprovar que aquests materials de l'estructura deltaica estan recolzats sobre materials més antics. Concretament, a les zones més properes a la llera del riu (com és el cas considerat) el delta està recolzat sobre materials del Pliocè (sorres i argiles sorrenques de color groguenc localitzades a més de 60 metres de fondària) mentre que en els extrems de la conca els materials són encara més antics (des de materials del Miocè fins a sòcol Paleozoic, segons la zona).

Aquesta estructura és la que es veu a la figura 3-4.

Descripció del problema.

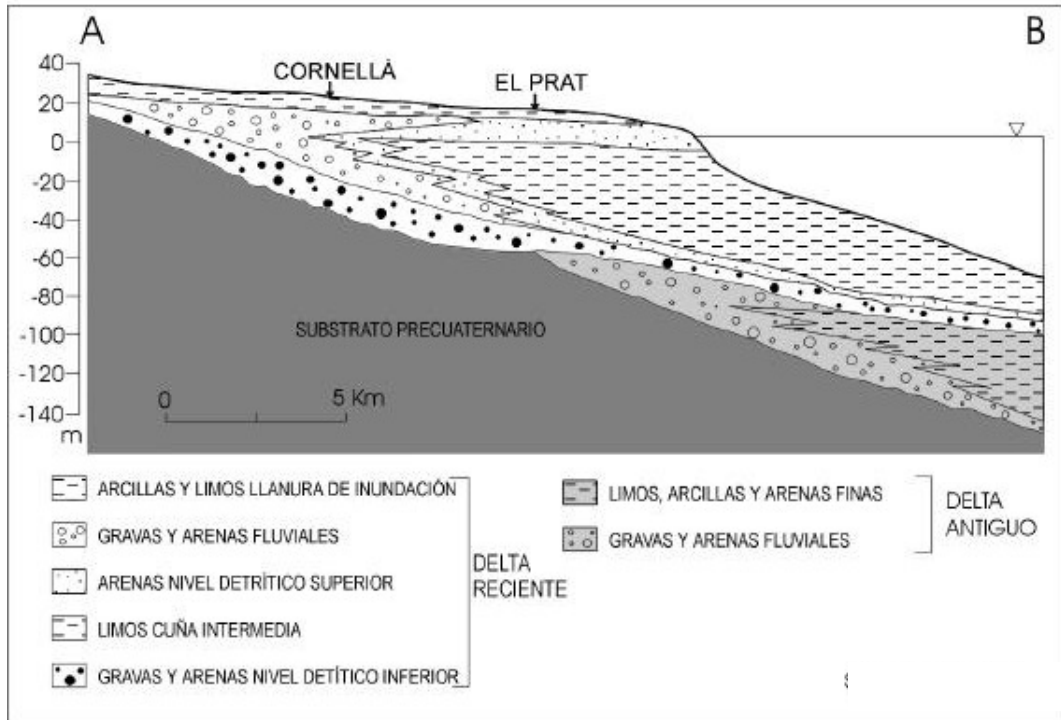


Figura 3-4. Tall geològic de la zona d'estudi (Ventayol, 2004).

A grans trets, el delta del Llobregat està format per dos grans paquets de sediments detrítics separats per una important intercalació llim - argilosa tal i com es pot veure a la figura 3-5.

Aquest esquema està realitzat a la pròpia zona on es va fer el terraplè de la prova de precàrrega.

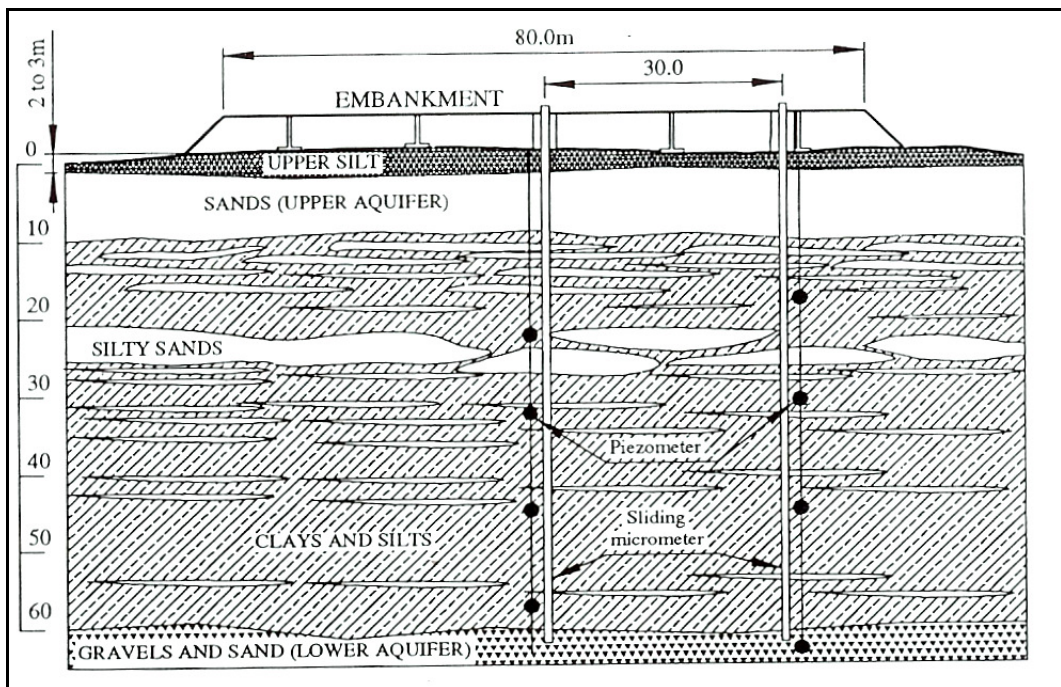


Figura 3-5. Tall esquemàtic de la situació geològica i hidrogeològica de la zona d'estudi de la precàrrega de millora del terreny (Alonso, E.E. et al, 1997).

Descripció del problema.

Una breu caracterització d'aquesta materials de sostre a base és la següent:

- Nivell superficial, format per argiles i llims que corresponen a la planura d'inundació del delta. Són sediments de color marró, encara que també inclouen els sediments dipositats per les petites llacunes associades al desenvolupament del delta que tenen coloració grisosa degut a la presència de matèria orgànica. Sobre aquests materials naturals, es troben rebliments antròpics de procedència variada i gruix variable.
- Nivell detrític superior està format per sorres mitges i gruixudes, bastant netes, de color marró que representen la sedimentació fluviodeltaica i litoral que progressa sobre els sediments del prodelta. Molt sovint està recobert per sòls o per altres materials de rebliment. Aquest rebliment correspon a uns llims de gruix variable entre 3 i 6 metres, mentre que el gruix de les sorres varia entre 5 i 7 metres.
- Nivell intermedi de sediments prodelta que no té una composició homogènia, ja que presenta una sèrie d'alternances que es detecten en variacions de la mida de gra (argiles i llims, llims sorrencs i sorres fines o llimoses) normalment de color gris. Aquestes variacions són degudes tan a variacions del nivell del mar com a modificacions de la línia de costa. La transició entre aquest tram i el nivell detrític superior és gradual, de forma que no és fàcil determinar la separació entre un i altre. De fet, aquest nivell té un important contingut de sorres cap al sostre. Aquest contingut ve descendint amb la fondària de manera que a base no hi ha sorres. Aquest tram correspon als materials més compressibles del terreny. La potència d'aquest tram està al voltant dels 50 metres.
- El nivell detrític inferior està format per dos materials clarament diferenciats: unes sorres de poca potència (entre 0.5 i 2 metres, desapareixen en alguns trams) recolzades sobre unes graves de potència variable (entre 0 i 10 metres). Representen els sediments al·luvials anteriors a l'actual delta. Aquest són els darrers materials considerats en aquest treball i, a efectes pràctics, es poden considerar indeformables.

Si considerem la gènesi dels diferents materials, es pot dir que les graves i sorres de la base de l'estructura deltaica són d'origen postglacial. El tram llim – argilós representa les diferents etapes de transgressió i regressió marina ocorregudes durant el Quaternari. Finalment, el nivell detrític superior correspon a sorres d'origen fluvial. En aquest nivell, s'han detectat alguns nivells rics en matèria orgànica que poden correspondre a petites zones amb ambient d'aiguamoll.

Amb la caracterització anterior, la situació hidrogeològica del materials del delta és la següent:

- Els nivell detrítics, tan l'inferior com el superior, són aqüífers. El nivell superior actua com a aqüífer lliure (aquífer superior) mentre que l'inferior actua com a aqüífer confinat (aquífer inferior).
- El tram llim – argilós que els separa actua com a aqüítard i això fa que els aqüífers es puguin considerar independents a efectes hidrogeològics i que confina l'aquífer inferior

La distribució dels aqüífers del delta del Llobregat es veu a la figura 3-6.

L'aigua de l'aquífer superior és de baixa qualitat (alta salinitat degut a l'aigua marina) i això ha fet que l'aquífer inferior hagi estat explotat intensament en el passat. Aquest fet ha provocat importants variacions en les pressions d'aigua mesurades en l'aquífer inferior, que presenta mesures clarament inferiors a la pressió hidrostàtica. Aquestes variacions de la pressió d'aigua ha afectat de manera directa a la distribució de tensions efectives del terreny i al comportament mecànic del mateix.

Descripció del problema.

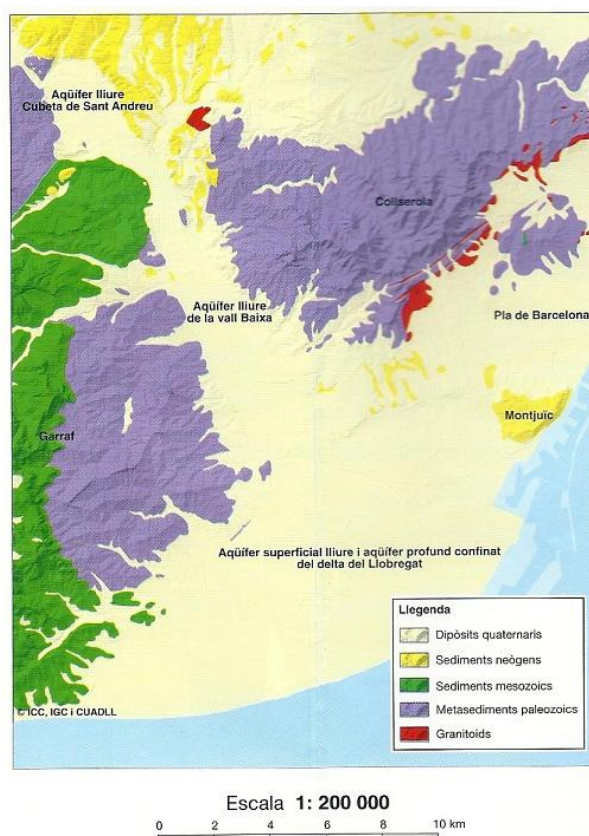


Figura 3-6. Situació hidrogeològica del Delta del Llobregat (Institut Cartogràfic de Catalunya, Institut Geològic de Catalunya, 2006).

Com s'ha vist a partir dels estudis realitzats, les condicions de pressió d'aigua hidrostàtica només es mantenen fins a una fondària d'entre 15 i 20 metres, que és la base del nivell detrític superior.

Per sota d'aquesta profunditat, no es coneix exactament la distribució de pressions d'aigua encara que es disposa d'algunes dades que poden ajudar a determinar-la. En els estudis realitzats s'observa que a les argiles situades a 60 metres de profunditat (just sobre les graves de l'aqüífer inferior) la pressió d'aigua és inferior a la hidrostàtica, concretament 5 m.c.a. (0,05 MPa) més petita.

Però aquesta no és la pressió d'aigua mínima mesurada ja que se sap que l'any 1973 aquesta diferència era molt més important, concretament de 25 m.c.a. (0,25 MPa) a la mateixa profunditat.

Aquesta sobreexplotació de l'aqüífer inferior ha tingut importants efectes en la deformabilitat del terreny, ja que la variació de les tensions efectives que s'han produït al llarg del temps ha provocat la sobreconsolidació de les argiles que estan immediatament per sobre d'aquest aqüífer. Per altra banda, aquesta sobreconsolidació no ha afectat a tot el paquet d'argiles ja que les argiles que estan just a sota de l'aqüífer superior no es veuen afectades per aquest fenomen degut, precisament, a la seva proximitat a aquest aqüífer.

Totes aquestes variacions són importants en el desenvolupament d'aquest treball, de manera que cal fixar algunes hipòtesis de treball, que són les següents:

- Es considera que la distribució de pressions d'aigua es la hidrostàtica fins als 18 metres de profunditat (P_w hidrostàtica).
- Per sota d'aquesta profunditat, la distribució de pressions d'aigua és inferior a la hidrostàtica i correspon a la distribució de pressions que dona la diferència de 0,05 Mpa entre ella i la pressió hidrostàtica. Aquesta és l'anomenada pressió actual, P_w actual.

Descripció del problema.

- La distribució de pressions d'aigua mínimes té una forma similar: fins als 18 metres de fondària coincideix amb la hidrostàtica i a partir d'aquí és molt inferior, fins assolir la diferència de 0.25 MPa amb el valor de la hidrostàtica. Aquesta és l'anomenada pressió mínima, P_w mínima.

Totes aquestes distribucions, es veuen en la figura 3-7.

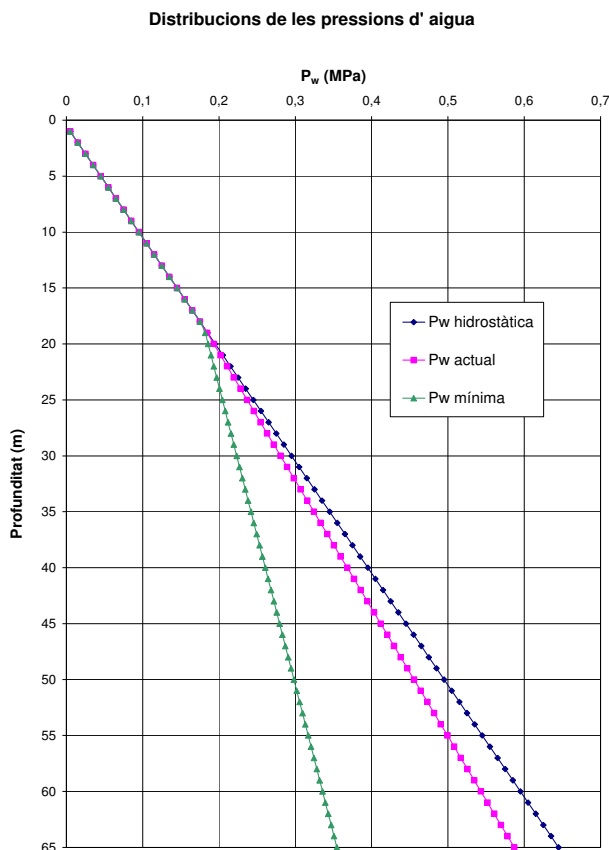


Figura 3-7. Representació de les diferents pressions d'aigua que han actuat al terreny al llarg del temps.

Sobre els materials anteriorment descrits s'ha construït la depuradora del Llobregat. Degut a la qualitat deficient dels materials sobre els que s'havia de treballar, es procedí a una millora del terreny consistent en una precàrrega molt extensa del terreny. Aquesta zona precarregada estava molt instrumentada per tal de conèixer i controlar l'evolució dels assentaments mentre durà la càrrega.

Prèviament a la precàrrega en tota l'extensió de la depuradora, es va realitzar una campanya de reconeixement del terreny consistent en 18 sondeigs i 92 assaigs de penetració estàtica (tant CPT com CPTu). Es va optar per els assaigs de penetració estàtica degut a la naturalesa dels materials (molt adients per aquest tipus d'exploració) i per la seva rapidesa, molt superior a la dels sondeigs.

Igualment, es va realitzar una precàrrega en una petita zona de la planta (veure figura 1-2) per avaluar la viabilitat del procediment. Aquesta zona de prova, anomenada zona test, té una gran importància al llarg d'aquest treball.

Cal indicar que el nivell intermedi del delta és el que té més repercussions geotècniques i que aquestes són diferents segons predominin les argiles o les sorres fines. En el primer cas, quan l'espessor supera els 15 - 20 metres es poden generar assentaments importants, si la càrrega és gran.

4 Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

4.1 Antecedents i recopilació de dades.

A finals de l'any 2002 es va finalitzar la construcció la gran Estació Depuradora d'Aigües Residuals del Baix Llobregat, al municipi del Prat de Llobregat, l'anomenada EDAR Baix Llobregat, que ocupa una àrea de més de 42 Ha, posant finalització a unes tasques que es van iniciar uns 6 anys abans.

La construcció d'aquesta EDAR va ser un ser un procés llarg i complexe perquè les males característiques geotècniques i hidrogeològiques dels terrenys on s'ha construït, no complien els requeriments necessaris de les estructures que han de suportar, principalment pel que fa a assentaments totals i diferencials. A causa de la gran extensió de l'obra i de la gran profunditat a la que és troba el substrat indeformable es va descartar la realització de fonamentacions profundes i es va decidir la millora del terreny utilitzant una gran precàrrega per consolidar el terreny.

Per conèixer exactament l'efecte de la precàrrega, abans de res, es va realitzar una precàrrega controlada en una àrea molt més petita, l'anomenada zona test. En aquesta zona test es va realitzar una caracterització exhaustiva del terreny amb sondeigs i assaigs de penetració estàtica abans d'aixecar el terraplè. Un cop fet, es van controlar els desplaçaments verticals que patia el terreny utilitzant extensòmetres lliscants.

Durant 2 anys i mig es va controlar aquesta precàrrega fins que a l'agost de l'any 1999 es van iniciar les obres pròpiament dites.

Una cronologia simplificada d'aquestes tasques és la següent:

- Caracterització prèvia del sòl: 1996.
- Construcció del terraplè de la zona test: octubre 1996 a desembre 1996.
- Seguiment deformacions de la zona test de la precàrrega: 1997 a desembre de 1998 (fase de càrrega), gener de 1999 a agost de 1999 (fase de descàrrega).
- Finalització del seguiment: agost de 1999.
- Inici de les obres: agost de 1999.
- Final de les obres: finals de 2002.

Cal destacar en aquesta seqüència el fet que l'assaig de la precàrrega inclou un període de descàrrega. De fet, el desembre de 1998 es van retirar els primers 1.5 metres del terraplè i es van continuar control·lant les deformacions.

La campanya de reconeixements del terreny va tenir diverses fases, tal i com es detalla a continuació:

- La primera fase va consistir en la realització de 8 sondeigs profunds (fins a 80 metres de profunditat) i 6 assaigs de penetració estàtica (CPTu). També es van col·locar a diferents profunditats 18 piezòmetres de corda vibrant, amb la intenció de determinar les condicions hidràuliques de la zona.
- La segona fase va consistir en un estudi molt acurat dels efectes de la precàrrega. Per fer-ho, es va construir un terraplè quadrat de 80 m de costat i 4 m d'alçada, l'anomenada zona test. Addicionalment, es van fer 7 sondeigs i 4 assaigs de penetració estàtica més, 2 CPT i 2 CPTu.
- La tercera fase del reconeixement va consistir en l'extensió dels assaigs i sondeigs a la totalitat de la planta de l'EDAR. D'aquesta manera, s'han realitzat un total de 18 sondeigs (d'entre 40 i 80 m de profunditat) i 92 assaigs de penetració estàtica.

La primera part d'aquest treball consisteix en l'estudi d'aquestes dades, sobretot de les obtingudes dels assaigs de penetració estàtica, ja que es pretén caracteritzar del terreny a partir d'elles.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

A la Taula 4-1 hi ha el llistat dels assaigs dels que es disposa, indicant la fondària assolida.

A la figura 4-1 es veu la situació dels assaigs realitzats a la zona test i a la figura 4-2 dels realitzats a tota la superfície de l'EDAR.

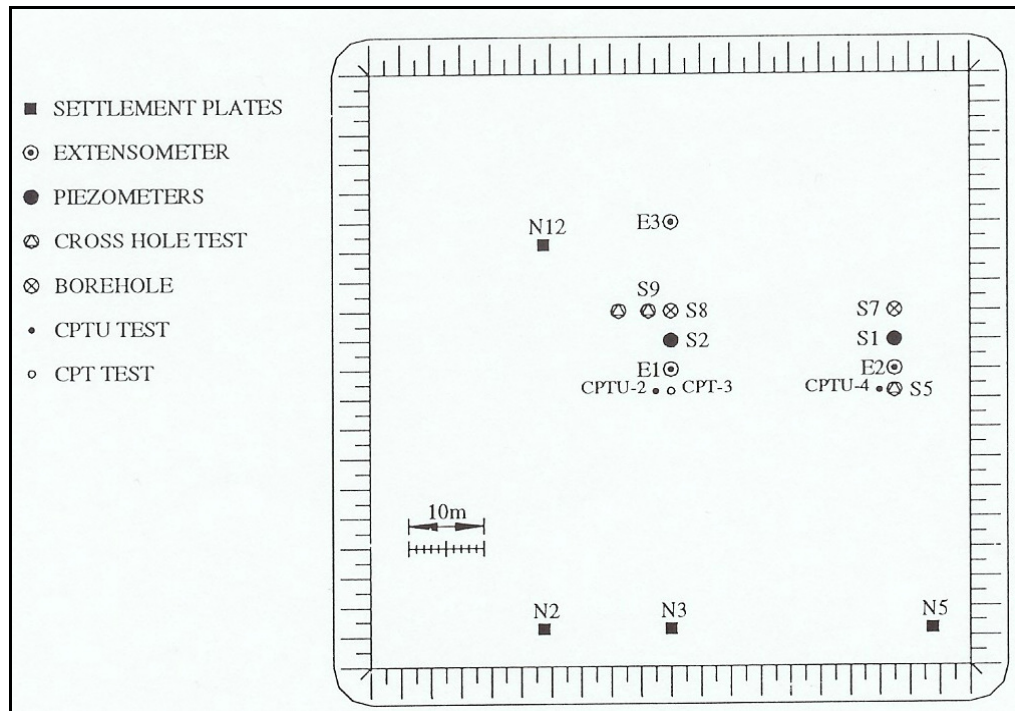


Figura 4-1. Situació dels assaigs de penetració estàtica (entre d'altres) a la zona test de la precàrrega (Alonso, E. E. et al, 1997).

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

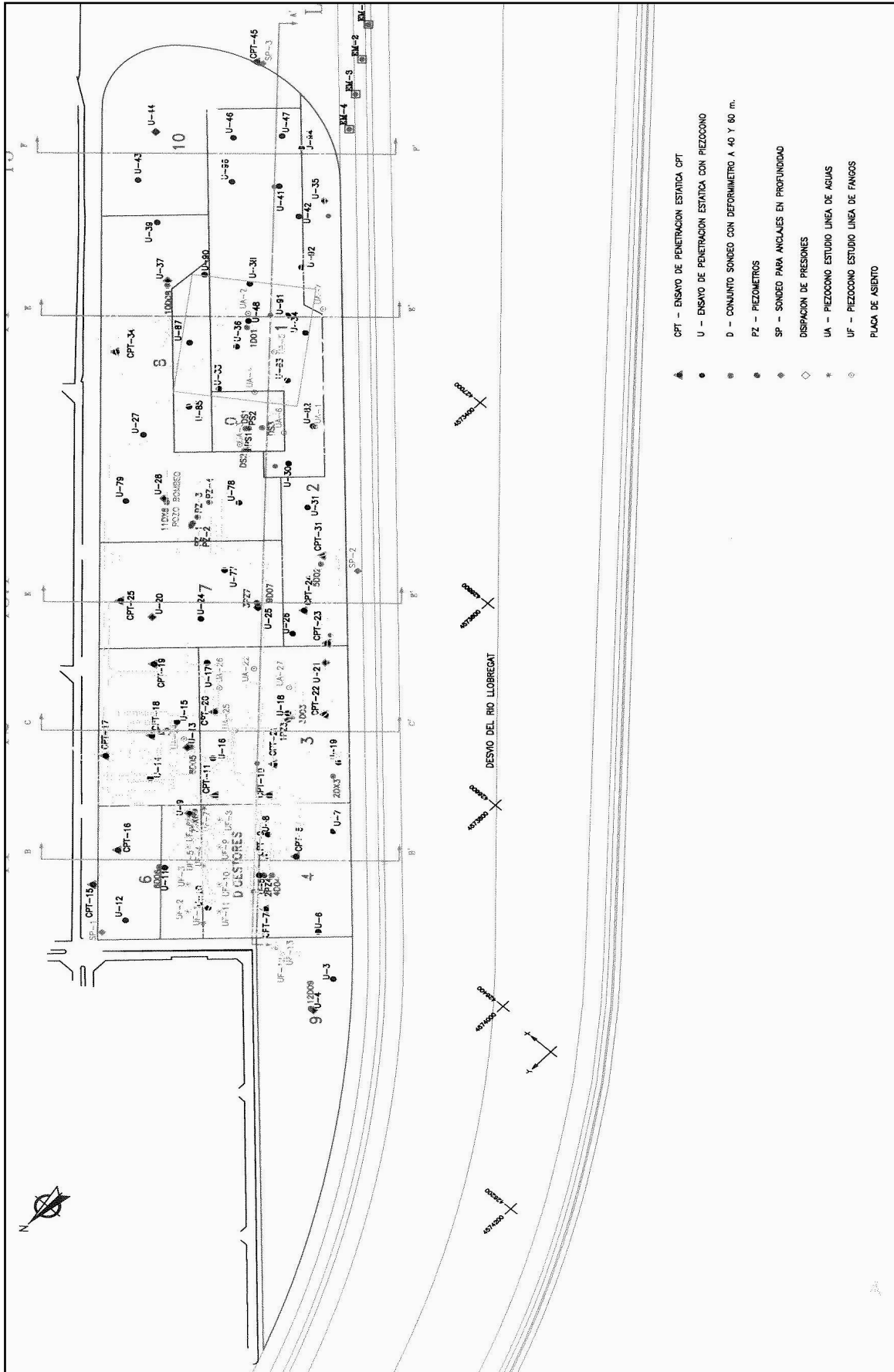


Figura 4-2. Situació dels assaigs de penetració estàtica a la EDAR (Alonso, E. E. et al, 1997)

Taula 4-1. Relació dels assaigs de penetració estàtica disponibles.

ASSAIG	PROFUNDITAT [M]
CPT 1*	36.17
CPT 3*	41.04
CPT 7	55.42
CPT 8	55.97
CPT 9	55.47
CPT 31	57.99
CPTu 2*	48.77
CPTu 4*	36.58
CPTu 6	55.48
CPTu 8	56.15
CPTu 9	58.49
CPTu 10	55.44
CPTu 13	57.79
CPTu 16	47.84
CPTu 18	56.16
CPTu 19	56.15
CPTu 23	48.77
CPTu 30	47.76
CPTu 31	57.63
CPTu 33	47.80
CPTu 35	64.00
CPTu 36	47.84
CPTu 38	47.79
CPTu 41	47.86
CPTu 43	36.58
CPTu 46	47.17
CPTu 47	47.84
CPTu 48	32.80
CPTu 82	47.15
CPTu 83	47.70
CPTu 90	47.76
CPTu 91	47.84
CPTu 92	47.82
CPTu 94	47.83
CPTu 96	47.84

(*) Aquests assaigs estan a la zona test de la precàrrega.

En total es disposa de 35 assaigs de penetració estàtica, 6 CPT i 29 CPTu.

La longitud total de tots els assaigs de penetració disponibles és de 1738.69 metres. Com que s'ha realitzat una mesura cada centímetre d'avanç en el terreny, en total es disposa de 173869 punts.

4.2 Bases dels assaigs de penetració estàtica.

Els assaigs de penetració estàtica consisteixen en la introducció al terreny, utilitzant sistemes hidràulics d'empenta, d'un penetròmetre amb punta cònica fent servir una sèrie de barnillatge, amb una velocitat de penetració constant.

S'han utilitzat dos tipus d'assaigs de penetració estàtica: el CPT (Cone Penetrating Test) i el CPTu.

L'objectiu dels dos assaigs és el mateix:

- La identificació dels materials que formen el subsòl.
- L'estimació d'alguns paràmetres geotècnics.

El CPT consisteix en un penetròmetre cilíndric amb extrem cònic que s'introdueix al terreny. Mentre es clava al sòl es mesuren, de manera continua, la resistència a l'avanç deguda a la punta i al fregament lateral.

El CPTu és una millora del CPT, que únicament difereix d'aquest en què permet la mesura de les pressions d'aigua sobre alguna superfície del penetròmetre gràcies a la incorporació d'un element porós.

A la pràctica, es fan servir dues posicions bàsiques de l'element porós: sobre la cara del con (U_1) o sobre la base del con (U_2).

Cal tenir present que la posició del filtre porós a la punta del con pot afectar a l'obtenció de lectures. Diversos autors han realitzat articles sobre aquest aspecte arribant a concloure que la posició de la pedra porosa no és indiferent en el moment de realitzar l'assaig (Robertson i Campanella, 1988). Cada posició presenta una sèrie d'avantatges i d'inconvenients però la tendència actual és la d'utilitzar la posició U_2 .

La col·locació d'aquests elements sobre el penetròmetre i les propietats geomètriques del mateix són les que es veuen a la figura 4-3.

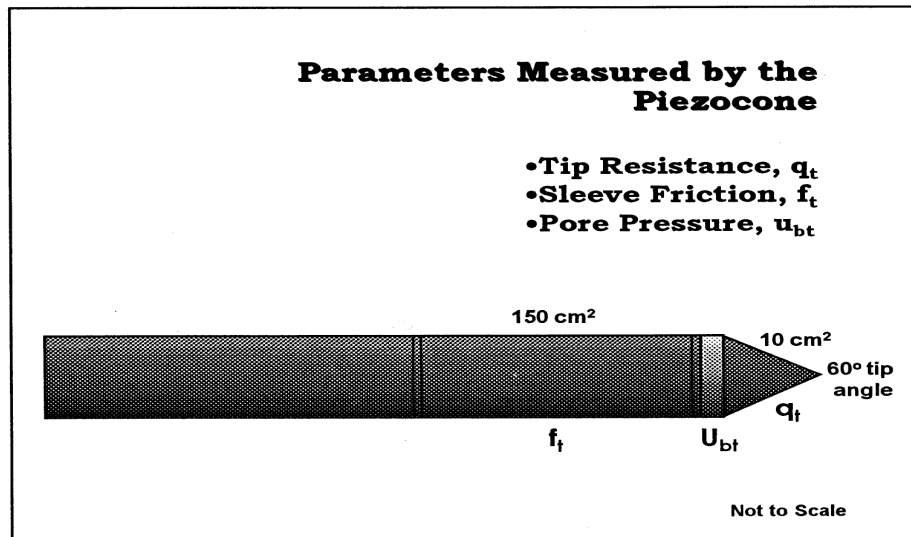


Figura 4-3. Esquema de la punta cònica d'un penetròmetre estàtic, en aquest cas un CPTu, amb la disposició dels diferents elements que la formen (Chen, B.S-Y, Mayne, P.W., 1994).

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Els principals avantatges del CPTu respecte del CPT són:

- Capacitat de diferenciar entre penetració drenada, parcialment drenada i no drenada.
- Capacitat de correcció de la resistència en punta del con q_c al considerar les pressions de porus.
- Proporcionar criteris addicionals per a una millor classificació del tipus de sòl i avaluació de les característiques de consolidació, si es realitzen els assaigs de dissipació corresponents.

La velocitat de penetració es manté constant durant la realització de l'assaig i acostuma a ser d'uns 20 mm/s. Si és més ràpida, es poden transmetre pressions addicionals a l'aigua del terreny i que la mesura de pressió de porus quedi falsejada. Si és més lenta, l'assaig perd una de les seves principals característiques, la velocitat d'execució.

A més a més, en el cas del CPT i CPTu utilitzats durant aquest treball, la inclusió d'un inclinòmetre permet conèixer la desviació que pateix la mida durant la realització de l'assaig.

4.3 Terminologia utilitzada en els assaigs de penetració estàtica.

En aquest apartat es descriuen breument els paràmetres de treball més utilitzats durant la interpretació de les dades obtingudes amb els assaigs de penetració estàtica.

- Resistència en punta del con (q_c):

És la relació entre la força aplicada al con per a que avanci (Q_c) i l'àrea del con (A_c). Correspon a la següent fórmula:

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (4.1)$$

- Resistència al fregament (f_s):

És la relació entre la força que actua sobre un dispositiu de mesura de la resistència a l'avanç deguda al fregament lateral ('manguito' de fregament) F_s i la superfície d'aquest element, A_s . Correspon a la següent expressió:

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (4.2)$$

- Coeficient de fregament (R_f):

És la relació entre la resistència al fregament f_s i la resistència en punta q_c a una profunditat fixada. S'expressa com a percentatge i es defineix amb la següent expressió:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100 \quad (4.3)$$

- Pressió de porus (u):

És la pressió de l'aigua mesurada durant l'assaig de penetració. La nomenclatura depèn de la posició de l'element porós en el penetròmetre, essent la més típica U_2 , que correspon a la pedra porosa col·locada just a sobre de la part cònica (figura 4 - 3).

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

- Excés de pressió de porus (Δu):

S'expressa com :

$$\Delta u = u_2 - u_0 \quad (4.4)$$

On u_0 és la pressió hidrostàtica i u_2 és la pressió de porus mesurada durant l'assaig.

- Resistència en punta corregida (q_t):

És la resistència en punta q_c corregida per efectes de la pressió de porus. Es calcula amb la fórmula que hi ha a continuació:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (4.5)$$

On q_c és la resistència en punta del con, U_2 és la pressió de porus mesurada al terreny i a és el coeficient d'àrea neta, que es defineix com la relació entre l'àrea neta del con, A_c , i l'àrea de recolzament de les cèl·lules de càrrega, A_n , (veure figura 4-4). Es calcula amb la següent fórmula:

$$a = \frac{A_n}{A_c} \quad (4.6)$$

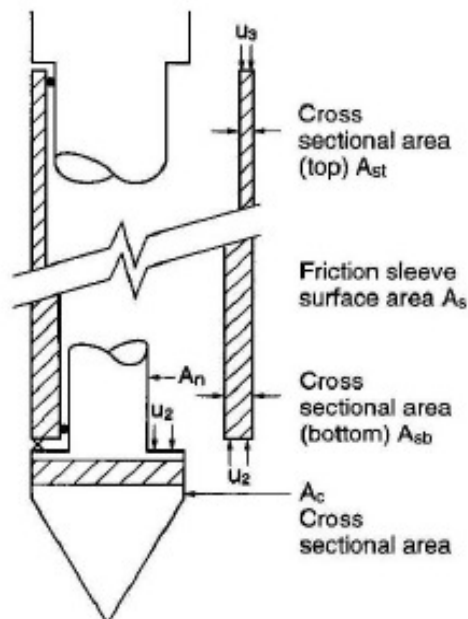


Figura 4-4. Relació de les àrees dels elements del CPTu que intervenen en el càlcul del paràmetre a (Lunne et al., 1997).

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

- Coeficient de pressió de porus (B_q):

És un paràmetre adimensional que es defineix com:

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4.7)$$

On σ_{v0} és la tensió vertical total a una profunditat fixada, q_t és la resistència en punta corregida i Δu és l'excés de pressió de porus.

- Resistència en punta normalitzada (Q_t):

És un paràmetre adimensional que es defineix com:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (4.8)$$

On q_t és la resistència en punta corregida, σ_{v0} és la tensió vertical total, σ'_{v0} és la tensió vertical efectiva a una profunditat fixada.

- Coeficient de fregament normalitzat (F_r):

És un paràmetre adimensional que es defineix com:

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4.9)$$

On q_t és la resistència en punta corregida, f_s és la resistència al fregament i σ_{v0} és la tensió vertical total a una profunditat fixada.

4.4 Anàlisi de les dades.

En els següents apartats d'aquest treball es descriuen les dades dels assaigs de penetració estàtica que s'han utilitzat en aquest treball. Només es consideren els assaigs realitzats a la zona test.

4.4.1 Dades bàsiques.

Les dades bàsiques que proporcionen els assaigs de penetració estàtica són les relacions següents:

Resistència en punta – profunditat :	q_c (MPa) – z (m).
Fregament – profunditat :	f_s (MPa) – z (m).
Pressió de porus – profunditat:	u_2 (MPa) – z (m).
Coefficient de fregament – profunditat :	R_f (%) – z (m).

Amb la representació gràfica d'aquestes dades és possible fer una primera classificació dels materials travessats a cada assaig. Els criteris de distinció que es fan servir es veuen a la Taula 4-2.

Taula 4-2. Criteris de classificació de materials a partir de les dades dels CPT – CPTu.

	q_c	f_s	R_f	u_2
Materials drenats	Valors elevats. Forma irregular (dents de serra) de la corba	Valors baixos	Valors baixos	Valors semblants a la pressió hidrostàtica.
Materials no drenats	Valors baixos. Forma suau de la corba	Valors més elevats que en el materials drenats	Valors alts	Valors alts en materials NC

Com es pot veure, la resistència al fregament, f_s , no aporta cap criteri de distinció clar i molt sovint no es fa servir per a la classificació dels materials. En el cas que ens ocupa, no s'utilitza.

Pel que fa a la pressió de porus cal tenir present que les argiles, al produir-se la penetració i trencament del terreny, la pressió es transmet inicialment a l'aigua intersticial. Al ser les argiles materials bàsicament impermeables, l'aigua no pot desplaçar-se ràpidament, motiu pel qual es registra molt sovint una pressió d'aigua superior a la hidrostàtica.

Pel que fa a les sorres cal diferenciar entre sorres dilatants i no dilatants. A les no dilatants, el procés és molt similar però al ser el terreny permeable, l'aigua pot fluir amb facilitat, no es registra cap sobrepressió. En canvi a les sorres dilatants, és a dir en les quals produir-se el trencament hi ha un increment de volum, l'aigua ocupa aquest l'espai que es genera i la pressió que es registra és inferior a la hidrostàtica. En el nostre cas, hi ha sorres no dilatants.

Tot i això, el criteri de la pressió de porus sí que es fa servir però s'ha vist que en determinats casos no és vàlid, ja que en alguns materials que verifiquen clarament els criteris de classificació de materials no drenats presenten una pressió de porus molt inferior a la hidrostàtica, fins i tot amb valors negatius (succions).

Una possible explicació a aquest fet és que aquests materials no drenats estan entre horitzons o nivells de materials drenats. D'aquesta forma, és possible que la mesura dels materials drenats sigui correcta però al trobar petits gruixos de materials no drenats, la mesura no es recuperi i prengui aquests valors anòmals. A tot això cal afegir-hi les peculiaritats hidrogeològiques de l'àrea estudiada, comentades a la introducció.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Per això es considera convenient realitzar una classificació amb criteris propis per als materials estudiats. Aquesta classificació està basada en els resultats obtinguts a la zona test de la precàrrega i l'estudi de les gràfiques dels assaigs estudiats és el que proporciona els criteris particulars que es faran servir a l'hora de diferenciar els materials presents al terreny.

Els criteris bàsics de classificació de materials a partir de les dades obtingudes pels assaigs de penetració estàtica són els expressats a la Taula 4-3.

Taula 4-3. Criteris per a la classificació dels materials.

	Resistència en punta q_c (MPa)	Coefficient de fregament R_f (%)	Pressió de porus u_2 (MPa)
Materials drenats	Valors alts	Valors baixos	Valors inferiors a la pressió hidrostàtica.
Materials no drenats	Valors baixos	Valors alts	Valors superiors a la pressió hidrostàtica.

El criteri de la pressió de porus es fa servir però s'ha vist que, en determinats casos, no és vàlid, com ja s'ha comentat anteriorment.

Les dades inicials de les què disposem són les gràfiques amb les dades dels assaigs de la zona test que estan representades a les figures 4-5 , 4 - 6 i 4-7.

De l'anàlisi d'aquestes dades es desprèn que cal fer algunes consideracions més per tal de realitzar la separació entre materials del terreny.

Aquestes consideracions són les següents:

- S'observa que l'increment de la resistència en punta (q_c) amb la profunditat per als materials cohesius segueix, de manera molt exacta, una recta, que anomenarem nivell de base de la resistència. L'equació d'aquesta recta no és constant per a tots els assaigs, però si que és molt semblant a tots els casos. A la Taula 4-4 es veuen els valors que té per als assaigs de la zona test.
- Es considera, per a fer la classificació, que aquesta recta té la següent equació:

$$q_c(z) = 0.4 + 0.036 \cdot z \quad (4.10)$$

On z és la profunditat expressada en metres i q_c en MPa. Els valors de la resistència en punta inicial, q_{c0} , i del gradient de q_c , ∇q_c , s'han obtingut a partir de l'estudi de les dades.

- Cal fixar un valor del coeficient de fregament, R_f , per a establir la separació entre materials cohesius i materials granulars. Aquest valor no és constant per a tots els assaigs analitzats, tot i que un valor de 1% és vàlid per a gran part dels assaigs. A la Taula 4-5 hi ha els valors que es fan servir per als assaigs de la zona test.

Taula 4-6. Valors de la resistència en punta inicial, q_{c0} , i del gradient de la resistència en punta, ∇q_c , de la recta que determina el nivell de base de la resistència en punta per als assaigs de la zona test.

Assaig	q_{c0} (MPa)	∇q_c
CPTu 2	0.40	0.0364
CPTu 4	0.45	0.0357
CPT 3	0.40	0.0360

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Taula 4-7. Valors del coeficient de fregament R_f que es considera com a separació entre els materials cohesius i els granulars per als assaigs de la zona test.

Assaig	R_f (%)
CPTu 2	1
CPTu 4	1
CPT 3	1.8

Aquests criteris s'han utilitzat en un programa en FORTRAN que fa la separació entre materials drenants i no drenants, en tram de metre, a partir de les dades dels assaig. A més a més, es calcula el valor mig de la resistència en punta q_c per a cada tram i cada material i dóna el gruix total de cada material, segons els criteris de classificació anteriorment esmentats.

Aquest programa ha quedat integrat dintre del programa més extens que es fa servir en apartats posteriors d'aquest treball.

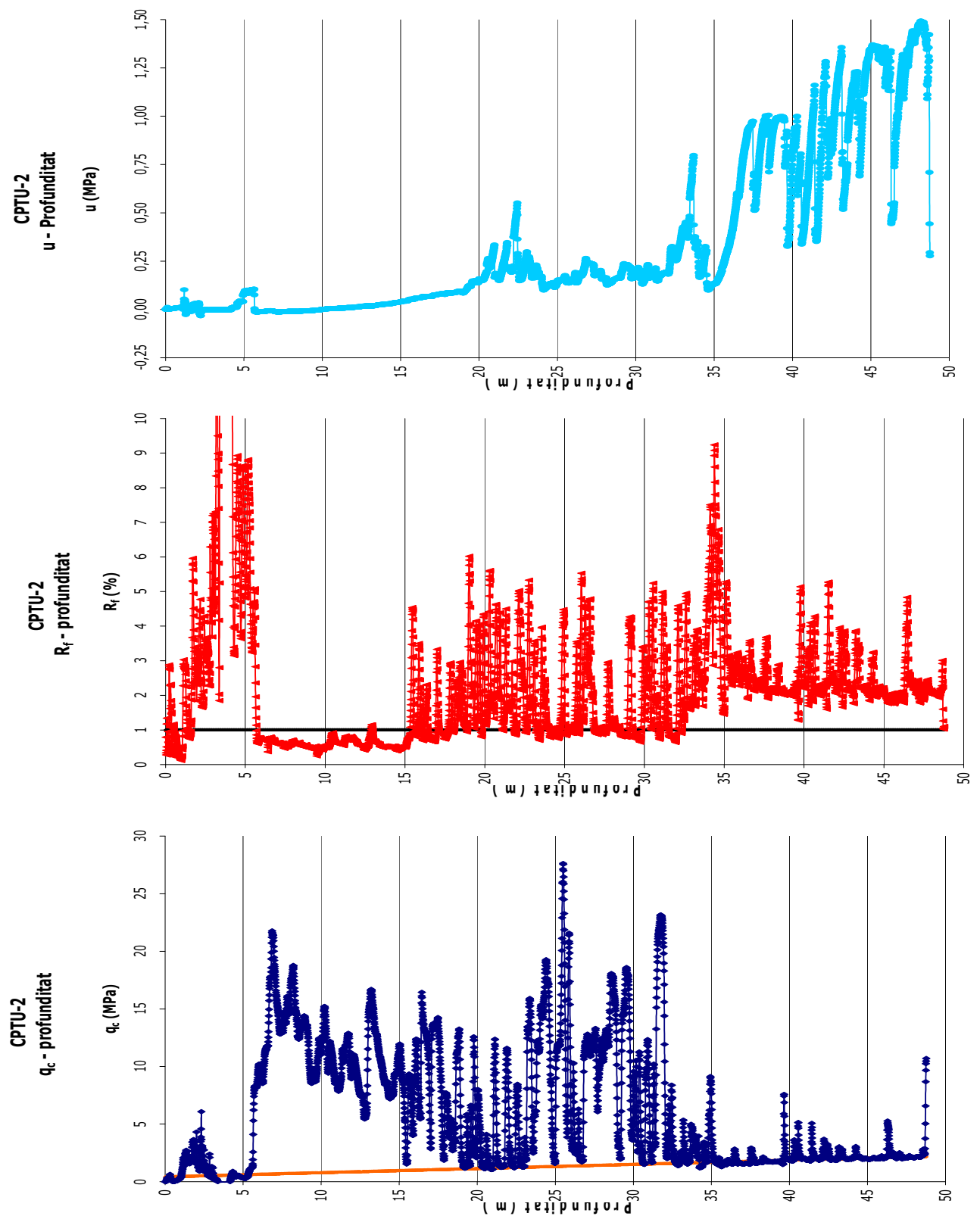


Figura 4-5. CPTu 2. Perfils de resistència en punta q_c (MPa), coeficient de fregament R_f (%) i pressió de porus u_2 (MPa) en funció de la profunditat (m).

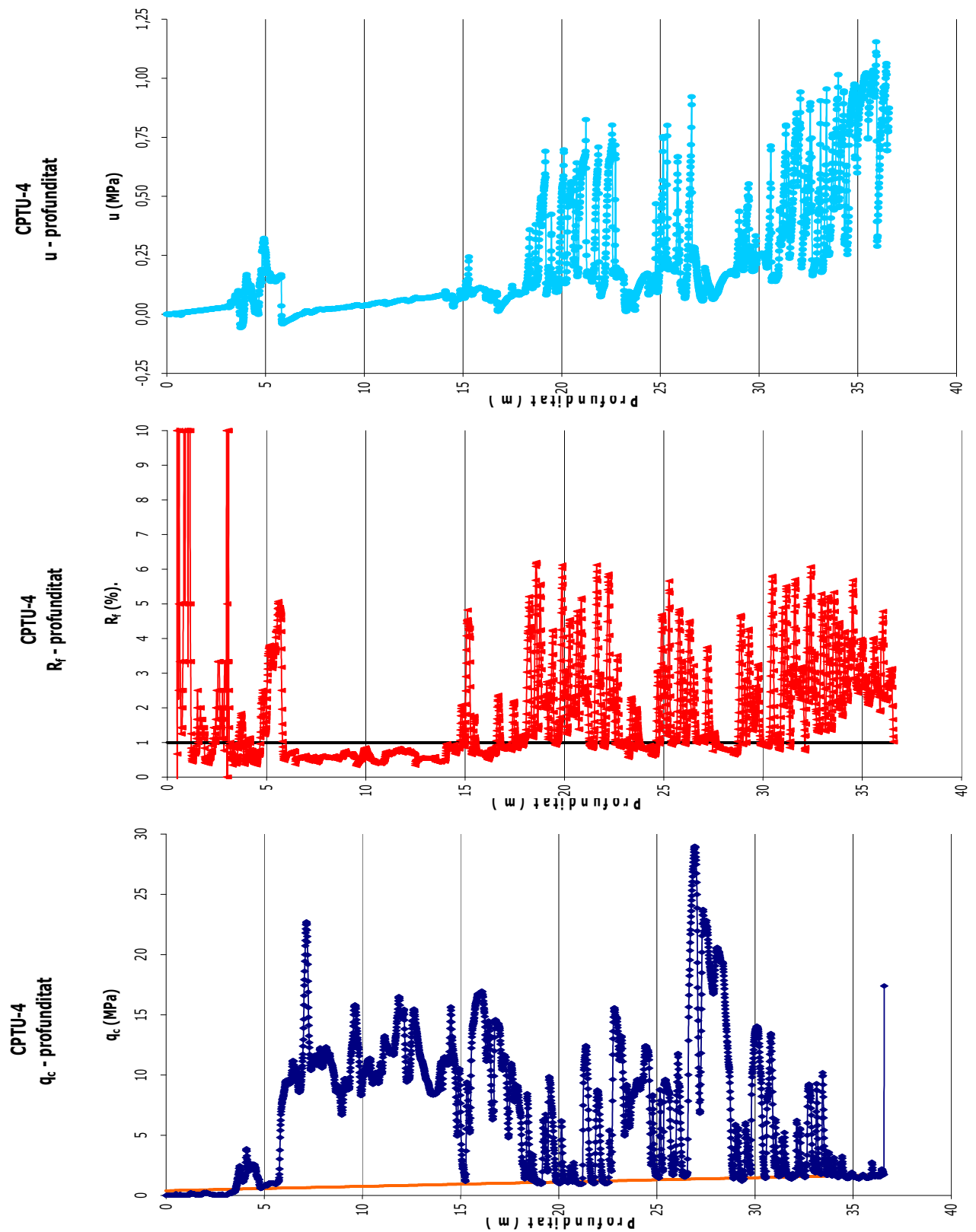


Figura 4-6. CPTu 4. Perfils de resistència en punta q_c (MPa), coeficient de fregament R_f (%) i pressió de porus u_2 (MPa) en funció de la profunditat (m).

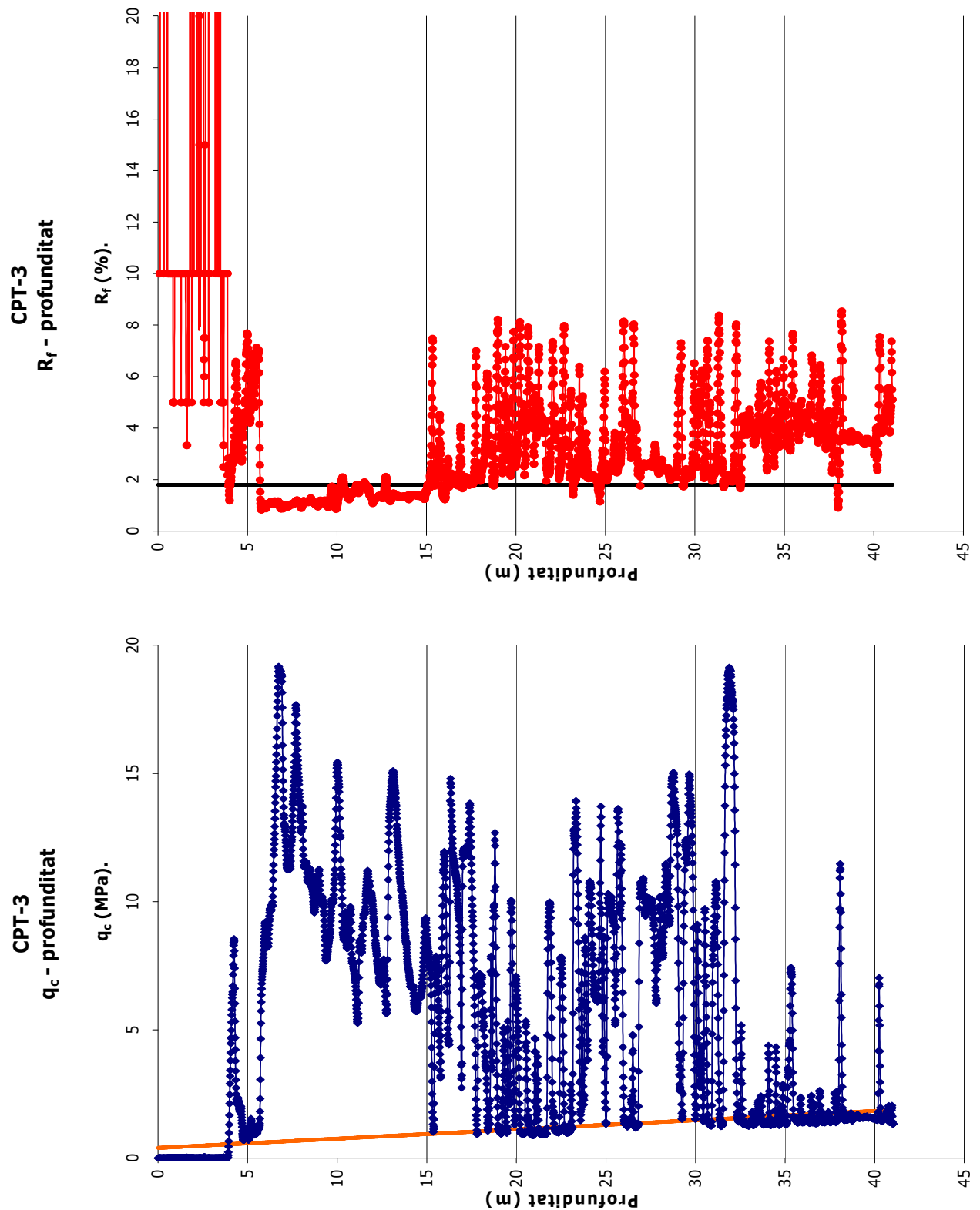


Figura 4-7. CPT 3. Perfils de la resistència en punta q_c (MPa) i del coeficient de fregament R_f (%) amb la profunditat (m).

4.4.2 Classificació del terreny estudiat.

Tal i com s'ha dit anteriorment, un dels principals avantatges dels assaigs de penetració estàtica es que permeten la diferenciació ràpida entre materials drenants (sorres) i materials no drenants (argiles i llims).

Partint d'aquesta idea i utilitzant alguns dels paràmetres definits anteriorment, s'han desenvolupat mètodes de classificació del terreny a partir dels resultats obtinguts.

En la realització d'aquest treball s'han utilitzat quatre classificacions diferents:

- Amb dades procedents de CPT: la de Douglas i Olsen (1981).
- Amb dades procedents de CPTu: la de Senneset, Sandven i Janbu (1984), les de Robertson (1986 i 1990) i la de Jefferies i Davies (1991).

Per aquestes classificacions s'han fet servir les dades de la zona test però no utilitzant-les directament, perquè degut a la gran quantitat de mesures realitzades (cada centímetre d'avanç del con), la interpretació és molt confusa. Per això, les dades que s'han fet servir són les originals però en trams de 100 punts, és a dir, per a cada metre de l'assaig. Aquesta modificació permet fer una interpretació més senzilla dels resultats de les classificacions corresponents a cada assaig.

El valor que s'utilitza per fer la classificació és el promig de les dades dels assaigs (i les seves combinacions) que formen part del tram d'un metre que es vol classificar. Això fa que si el tram té una composició homogenia les dades tenen poca dispersió i el punt equivalent és molt representatiu, però si és un tram heterogeni, la dispersió del valors és molt més gran i la representativitat no resulta tan bona.

A més, es diferencien 4 trams en funció de la profunditat per veure si les classificacions utilitzades tenen una correspondència prou bona amb el model de terreny utilitzat. Els quatre trams considerats són els següents:

- Tram 1: de 0 a 6 metres de profunditat.
- Tram 2: de 6 a 18 metres de profunditat.
- Tram 3: de 18 a 30 metres de profunditat.
- Tram 4: de 30 metres de profunditat fins el final de l'assaig.

Els resultats de cadascuna de les classificacions de terreny utilitzades es comenta segons aquests trams.

4.4.2.1 Classificació de Douglas i Olsen.

De les classificacions utilitzades és la més senzilla perquè es basa en les dades obtingudes a través d'un CPT, és a dir, la classificació només fa servir la resistència en punta q_c , la resistència al fregament f_s i el coeficient de fregament R_f . A més a més, expressa el resultat segons la classificació universal de sòls de Casagrande (veure la figura 4-8).

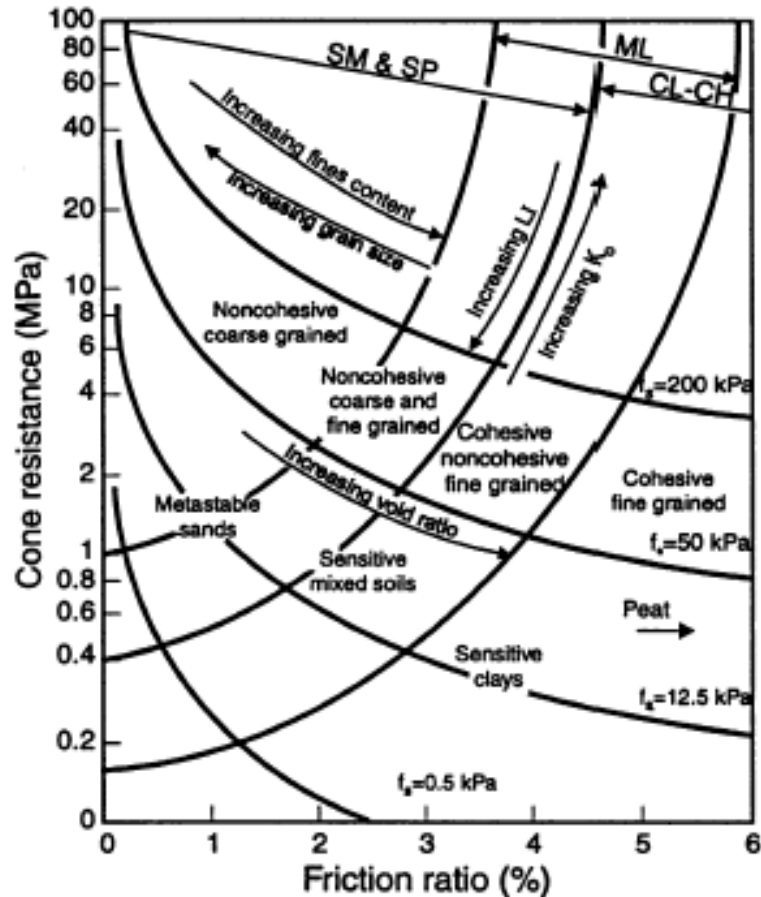


Figura 4-8. Classificació de Douglas i Olsen (Douglas i Olsen, 1981).

Els resultats es resumeixen a la figura 4-9 i a la Taula 4-8.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Taula 4-8. Resum de la classificació de Douglas i Olsen a la zona test.

	CPTu-2	CPTu-4	CPT-3
Tram 1	Només hi ha representats 4 punts: 1 a la zona de materials ML i SM - SP, 2 a la zona ML i CL - CH (indicada com 'cohesive noncohesive fine grained') i el darrer fora de classificació encara que està dintre del rang ML i CL - CH.	Només hi ha 3 punts: 2 a la zona de materials ML i SM - SP, molt a prop de la zona de sorres metaestables, i el tercer a la zona de materials cohesius (ML i CL - material ML i CL - CH ('cohesive noncohesive fine grained')).	Només apareixen 2 punts d'aquest tram a la zona de material ML i CL - CH ('cohesive noncohesive fine grained').
Tram 2	Tots els punts estan a la zona de material SM - SP ('noncohesive coarse grained').	Tots els punts a la ja esmentada excepte un dintre de la zona SM-SP i ML ('noncohesive coarse and fine grained').	Passa el mateix que al CPTU-2.
Tram 3	Tots els punts estan entre la zona SM - SP ('noncohesive coarse grained') i la zona SM - SP i ML ('noncohesive coarse and fine grained').	Tots els punts estan a la zona SM - SP menys un que està a la zona ML i CL - CH ('cohesive noncohesive fine grained').	Tots els punts estan entre la zona SM - SP i la CL - CH.
Tram 4	La majoria de punts estan a la zona SM - SP i ML, amb un punt a la zona ML i CL - CH i un altre a la CL - CH.	Tots els punts estan a la zona SP - SM i ML i a la ML i CL - CH.	Tots els punts estan a la zona de material ML i CL - CH, excepte un que està a la zona SP - SM i ML.

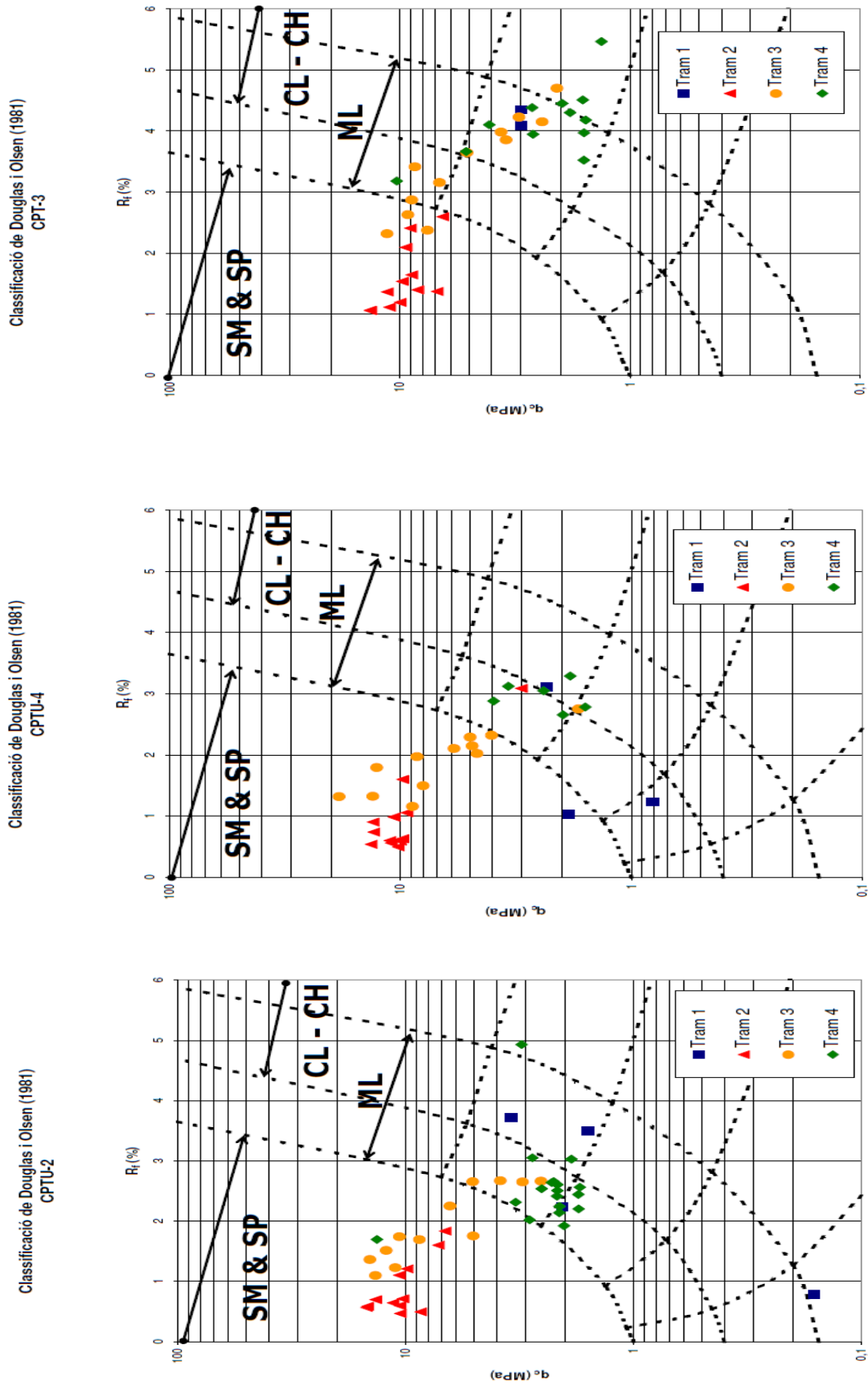


Figura 4-9. Resultat de la classificació de Douglas i Olsen aplicada als assaigs de la zona test.

Les classificacions següents són més complexes que la de Douglas i Olsen perquè no utilitzen resultats directes dels assaigs sinó que fan servir paràmetres modificats. Això es degut a que són classificacions basades en el CPTu i es fan servir les mesures de pressió de porus.

4.4.2.2 Classificació de Senneset, Sandven i Janbu.

La primera d'aquestes classificacions és la de Senneset, Sandven i Janbu (Senneset et al., 1984). És una classificació basada en la resistència en punta corregida q_t i en el coeficient de pressió de porus B_q . A partir d'aquests valors es defineixen una sèrie de zones que corresponen al tipus de terreny estudiat.

El resum d'aquesta classificació es veu a la figura 4-10.

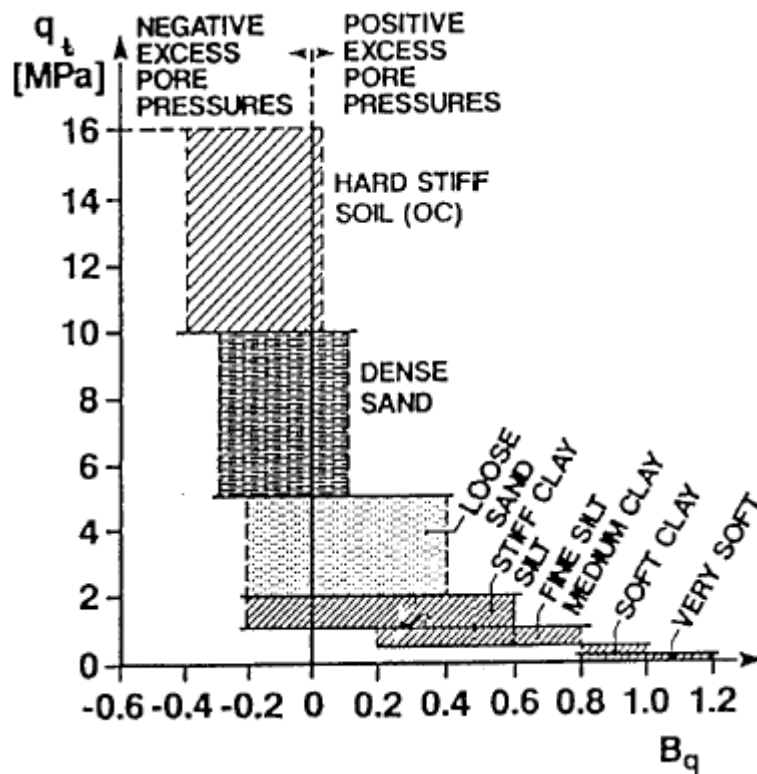


Figura 4-10. Taula resum de la classificació de Senneset, Sandven i Janbu (Senneset et al., 1984).

Observi's que la pròpia classificació indica la existència de punts fora de les àrees definides.

Els resultats obtinguts són els comentats a la Taula 4-9 i presentats a la figura 4-11.

Taula 4-9. Resultats obtinguts amb la classificació del terrenys de Senneset, Sandven i Janbu (Senneset et al., 1984).

	CPTu-2	CPTu-4
Tram 1	Hi ha representats els sis punts dels quals, tres queden fora de les zones definides, 2 estan dintre de la zona de les sorres soltes i un està a la zona dels llims i argiles rígids.	Només hi ha representats 5 punts: 3 fora de les zones definides, un a la zona de les sorres soltes i l'altre a la zona dels llims i argiles rígids.
Tram 2	Tots els punts estan a les zones de sòl molt rígid i sorra densa.	Tots els punts estan a les zones de sòl molt rígid i sorra densa.
Tram 3	Tots els punts estan a les zones de sòl molt rígid, sorres denses i sorres soltes.	Hi ha un punt fora de les zones definides. La resta estan a les zones de sòl molt rígid, sorres denses, sorres soltes i llims i argiles rígids (només un punt).
Tram 4	La majoria de punts estan a les zones de sorres soltes i llims i argiles rígids. Hi ha varis punts fora de les zones definides per tenir valors molt elevats de Bq.	Els punts estan dintre de les zones de sorres soltes i llims i argiles rígids.

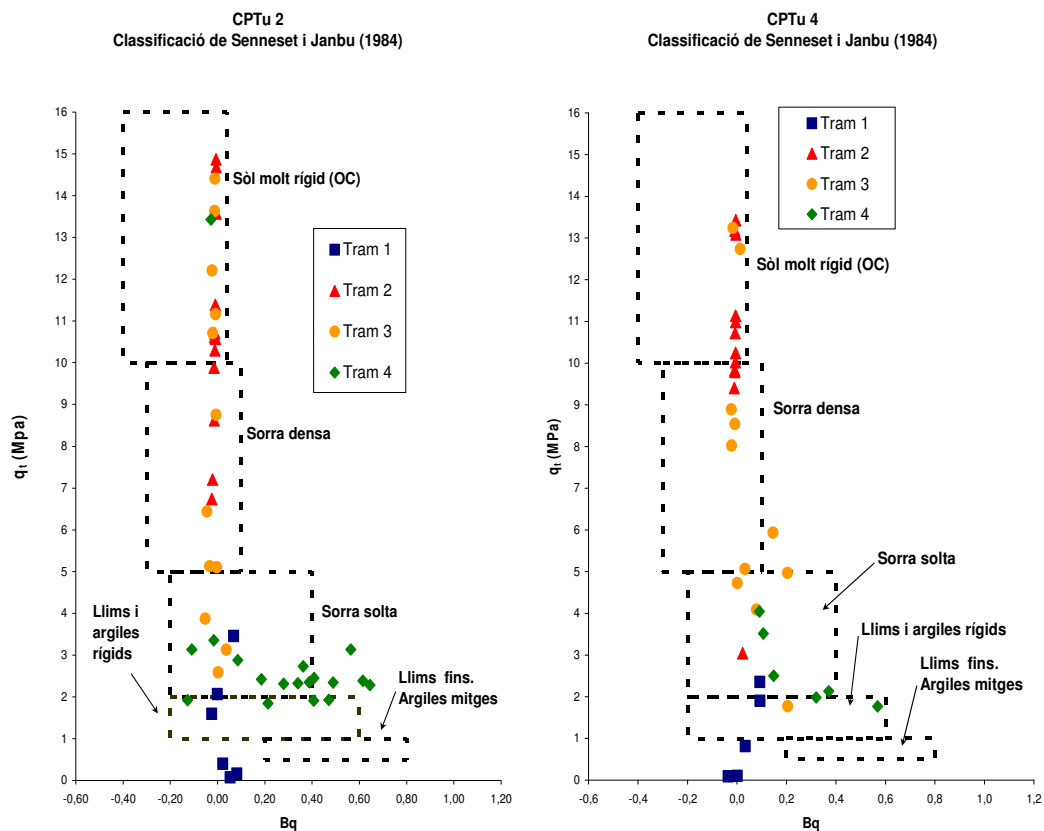


Figura 4-11. Resultats de la classificació de Senneset, Sandven i Janbú a la zona test.

4.4.2.3 Classificació de Robertson (1986).

La primera classificació de Robertson (Robertson et al., 1986) utilitza una doble taula per a realitzar la classificació del sòl. Els paràmetres que fa servir són el coeficient de fregament R_f , el coeficient de pressió de porus B_q i la resistència en punta corregida q_t . Noti's que una de les taules utilitzades és igual a la feta servir en la classificació de Senneset i Janbú (1984) per bé que les àrees marcades són diferents.

Un dels principals inconvenients d'aquesta classificació està en que expressa el resultat segons un sistema propi de nomenclatura del terreny, l' SBT (Soil Behaviour Type), que defineix 12 tipus de terreny, com es veu a la Taula 4-10.

Taula 4-10. Tipus de sòls (SBT) definits a la classificació de Robertson (1986).

Zona	SBT		
1	Sòl sensitiu de gra fi	5	Llim argilós a argila llimosa
2	Material orgànic	6	Llim sorrenc a llim argilós
3	Argila	7	Sorra llimosa a llim sorrenc
4	Argila llimosa a argila	8	Sorra a sorra argilosa
		9	Sorra
		10	Sorra amb graves a sorra
		11	Sòl de gra fi molt rígid*
		12	Sorra a sorra argilosa*

* Indica que el material està sobreconsolidat o cimentat.

Aquesta classificació queda resumida a la figura 4-12.

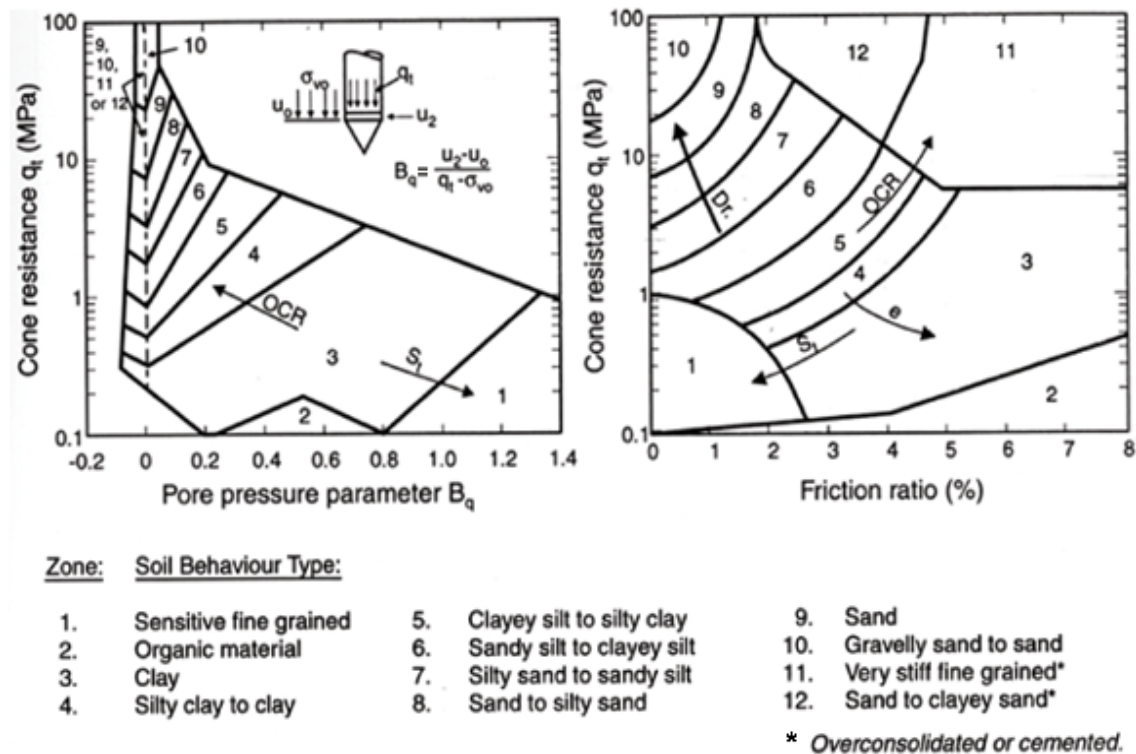


Figura 4-12. Taula resum de la classificació de Robertson (Robertson et al., 1986).

Els resultats obtinguts són els que es mostren a la Taula 4-11 i a la figura 4-13.

Taula 4-11. Resultats obtinguts amb la classificació de Robertson (Robertson et al., 1986).

	CPTu-2	CPTu-4
Tram 1	<p>Hi ha quatre punts representats a les dues taules.</p> <p>A la taula $B_q - q_t$ hi ha 3 punts a la zona 6 (llim sorrenc a llim argilós) i un a la zona 3 (argila).</p> <p>A la taula $R_f - q_t$ hi ha un punt a la zona 3, un a la zona 4 i un a la 5 (argila, argila llimosa i llim argilós). El darrer punt està a la zona 1, és a dir, sòls sensitius granulars.</p>	<p>Hi ha 4 punts representats a la taula $B_q - q_t$, 1 fora de la taula i els altres 3 a les zones 5 i 6 (argila llimosa, llim argilós i llim sorrenc).</p> <p>A la taula $R_f - q_t$ 3 punts, a les zones 5 i 6 (argila llimosa, llim argilós i llim sorrenc).</p>
Tram 2	<p>A la taula $B_q - q_t$ tots els punts queden dintre de les zones 8 i 9 (sorra argilosa a sorra).</p> <p>A la taula $B_q - q_t$, queden a les zones 7, 8 i 9 (sorra llimosa, sorra argilosa i sorra).</p>	<p>A la taula $B_q - q_t$ tots els punts estan a la zona 9 (sorra) excepte un que està a la zona 7 (sorra llimosa a llim sorrenc).</p> <p>A la taula $R_f - q_t$, la majoria de punt estan a les zones 8 i 9 (sorra argilosa a sorra), excepte un a la zona 6 (llim sorrenc a llim argilós).</p>
Tram 3	<p>A la taula $B_q - q_t$ els punts representats estan a les zones 7, 8 i 9 (sorra llimosa, sorra argilosa i sorra).</p> <p>A la taula $R_f - q_t$ estan a les zones 5, 6, 7 i 8 (argila llimosa, llim argilós, llim sorrenc, sorra llimosa i sorra argilosa).</p>	<p>A la taula $B_q - q_t$ els punts estan a 5, 6, 7, 8 i 9 (argila llimosa, llim argilós, llim sorrenc, sorra llimosa, sorra argilosa i sorra).</p> <p>A la taula $R_f - q_t$ estan a les zones 5, 6, 7 i 8 (argila llimosa, llim argilós, llim sorrenc, sorra llimosa i sorra argilosa).</p>
Tram 4	<p>A la taula $B_q - q_t$ la majoria de punts estan a la zona 4 (argila llimosa i argila), però també n'hi ha a les zones 3, 5, 6 i 7 (argila, argila llimosa, llim argilós, llim sorrenc i sorra llimosa) i hi ha dos punts fora de la taula.</p> <p>A la taula $R_f - q_t$ la majoria de punts estan a les zones 5 i 6 (argila llimosa, llim argilós i llim sorrenc) però hi ha un punt a la zona 3 (argila) i un altre a la 8 (sorra a sorra argilosa).</p>	<p>A la taula $B_q - q_t$ hi ha punts a les zones 3, 4, 5 i 6 (argila, argila llimosa, llim argilós i llim sorrenc).</p> <p>A la taula $R_f - q_t$ els punts es concentren a les zones 6 i 5 (argila llimosa, llim argilós i llim sorrenc).</p>

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

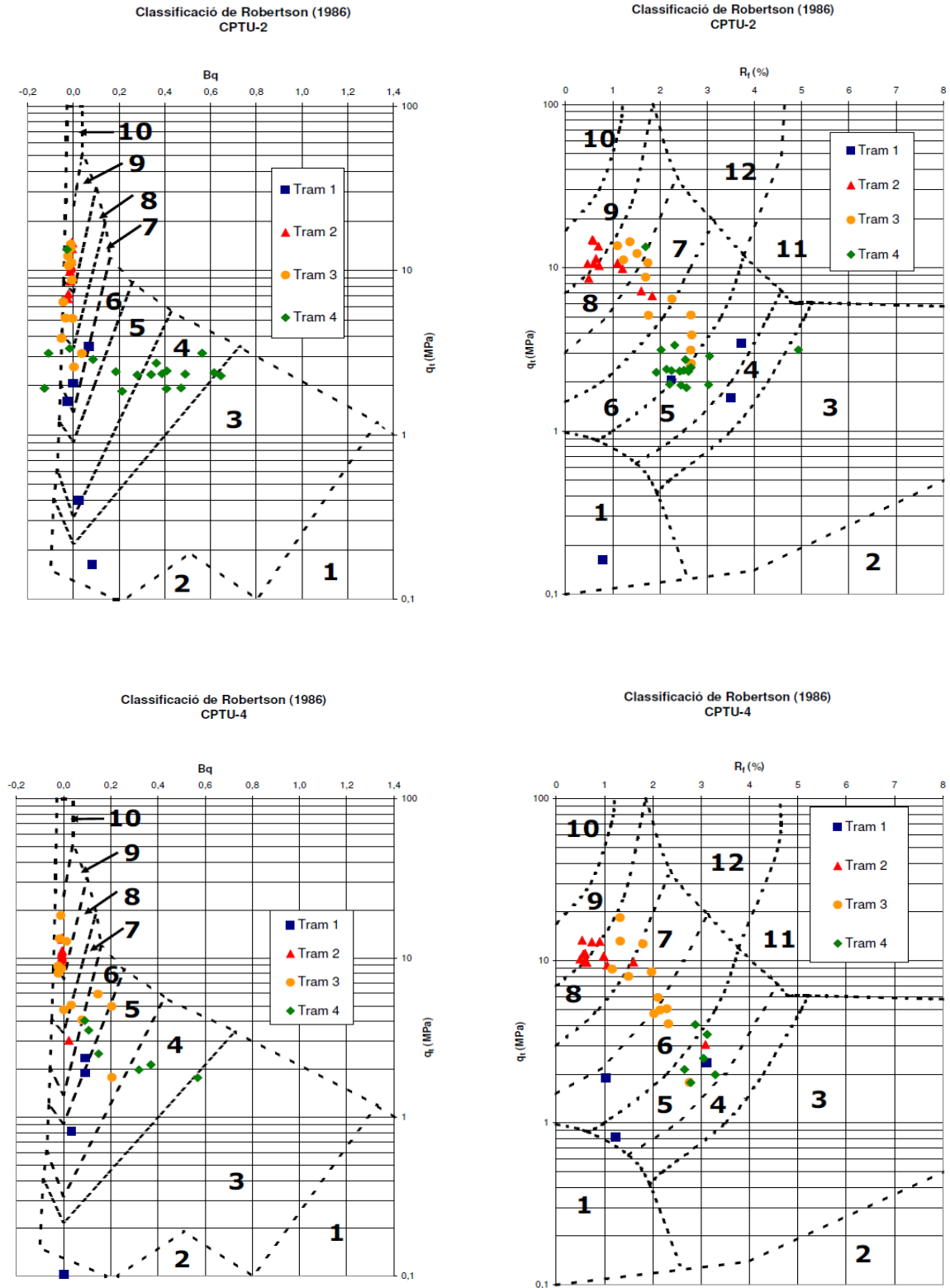


Figura 4-13. Resultats de la classificació de Robertson a la zona test (Robertson et al., 1986).

4.4.2.4 Classificació de Robertson (1990).

Aquesta classificació és una modificació posterior de la classificació anterior realitzada pel propi Robertson (Robertson, 1990) amb la introducció de dos paràmetres nous, la resistència en punta normalitzada Q_t i el coeficient de fregament normalitzat F_r substituïnt a la resistència en punta corregida q_t i al coeficient de fregament R_f .

Igual que l'anterior classificació fa servir una doble taula i dona els resultats segons l' SBT, però en aquest cas només es defineixen 9 zones, tal i com es pot veure a la Taula 4-12.

Taula 4-12. Tipus de sòls (SBT) definits a la classificació de Robertson (Robertson, 1990).

Zona	SBT
1	Sòls sensitius de gra fi
2	Sòls orgànics
3	Argila a argila llimosa
4	Barreja de llims; llim argilós
5	Barreja de sorres; sorra llimosa
6	Sorra; sorra neta a sorra llimosa
7	Graves i sorres a sorres argila llimosa
8	Sorra molt rígida a sorra argilosa
9	Sòl de gra fi molt rígid

La classificació queda resumida en la figura 4-14.

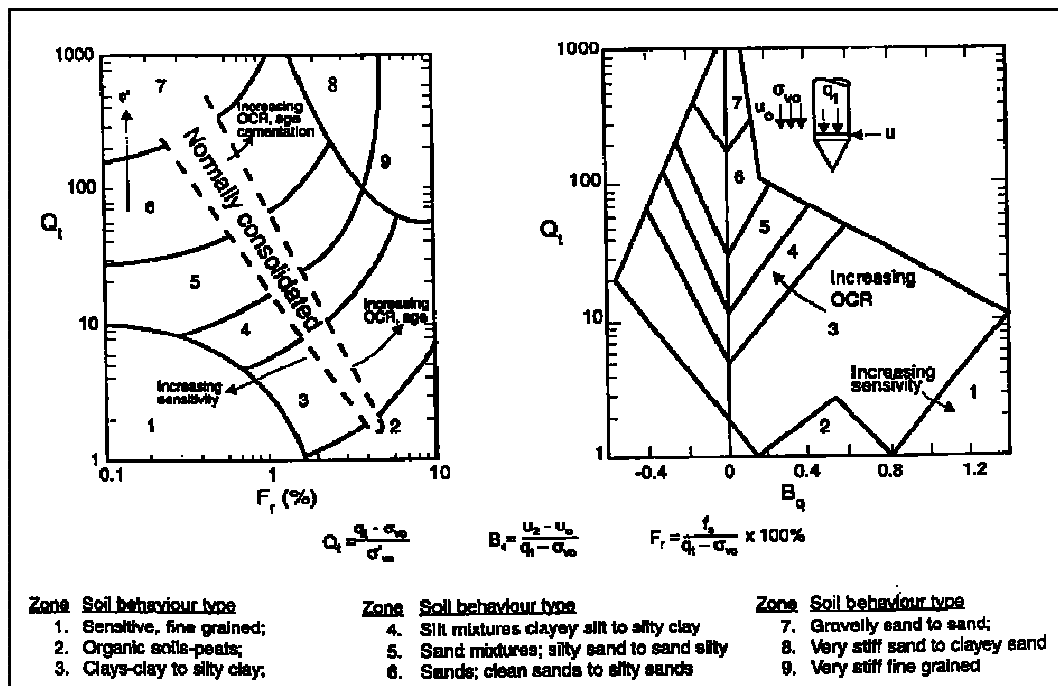


Figura 4-14. Taula resum de la classificació de Robertson (Robertson, 1990).

Al ser una classificació modificada a partir de l'anterior classificació de Robertson, els resultats són molt similars i es troben a la Taula 4-13 i a la figura 4-15.

Taula 4-13. Resultats obtinguts amb la classificació de Robertson (Robertson, 1990).

	CPTu-2	CPTu-4
Tram 1	<p>Hi ha 5 punts representats a les dues taules. A la taula $F_r - Q_t$ hi ha punts a les zones 3, 4 i 5 (argila, argila llimosa, llim argilós i sorra llimosa).</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ tots els punts estan a la zona 6 (sorra neta i sorra llimosa) menys un que està a 4 (llim argilós a argila llimosa).</p>	<p>Hi ha 4 punts representats a la taula $F_r - Q_t$ i estan a les zones 3, 4 i 5 (argila, argila llimosa, llim argilós i sorra llimosa), un d'ells dintre de l'àrea de material NC.</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ hi ha 5 punts representats, tres a la zona 5 (sorra llimosa a llim sorrenc) , un a la 3 (argila i argila llimosa) i un fora de la taula.</p>
Tram 2	<p>A la taula $F_r - Q_t$ tots els punts es troben a les zones 5 i 6 (llim sorrenc, sorra llimosa i sorra neta), molts dintre de l'àrea de material NC.</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ tots els punts estan a les zones 6 i 7 (sorra llimosa, sorra neta i grava).</p>	<p>A la taula $F_r - Q_t$ gairebé tots els punts estan a les zones 5 i 6 (llim sorrenc, sorra llimosa i sorra neta), molts dintre de l'àrea de materials NC; només un està a la zona 3 (argila a argila llimosa).</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ tots els punts es troben dins de la zona 6 (sorra llimosa i sorra neta).</p>
Tram 3	<p>A la taula $F_r - Q_t$ els punts estan a les zones 3, 4 i 5 (argila, argila llimosa, llim argilós i sorra llimosa), dos a la zona de material NC.</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ estan a les zones 4, 5 i 6 (argila llimosa, llim argilós, sorra llimosa i sorra neta).</p>	<p>A la taula $F_r - Q_t$ els punts estan principalment a les zones 4 i 5 (argila llimosa, llim argilós i sorra llimosa) però n'hi ha un a la zona 3 (argila i argila llimosa).</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ estan a les zones 3, 4, 5 i 6 (argila, argila llimosa, llim argilós, sorra llimosa i sorra neta), però només hi ha un punt a cadascuna de les dues primeres.</p>
Tram 4	<p>A la taula $F_r - Q_t$ la majoria dels punts estan a la zona 3 (argila i argila llimosa), alguns a l'àrea de material NC; n'hi ha un a la zona 5 (llim sortrenc i sorra llimosa).</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ els punts estan a les zones 3 i 4 (argila, argila llimosa i llim argilós).</p>	<p>A la taula $F_r - Q_t$ tots els punts estan a la zona 3 (argila i argila llimosa), tres a l'àrea de materials NC.</p> <p>A la taula $B_q - Q_t$ els punts estan entre les zones 3 i 4 (argila, argila llimosa i llim argilós).</p>

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

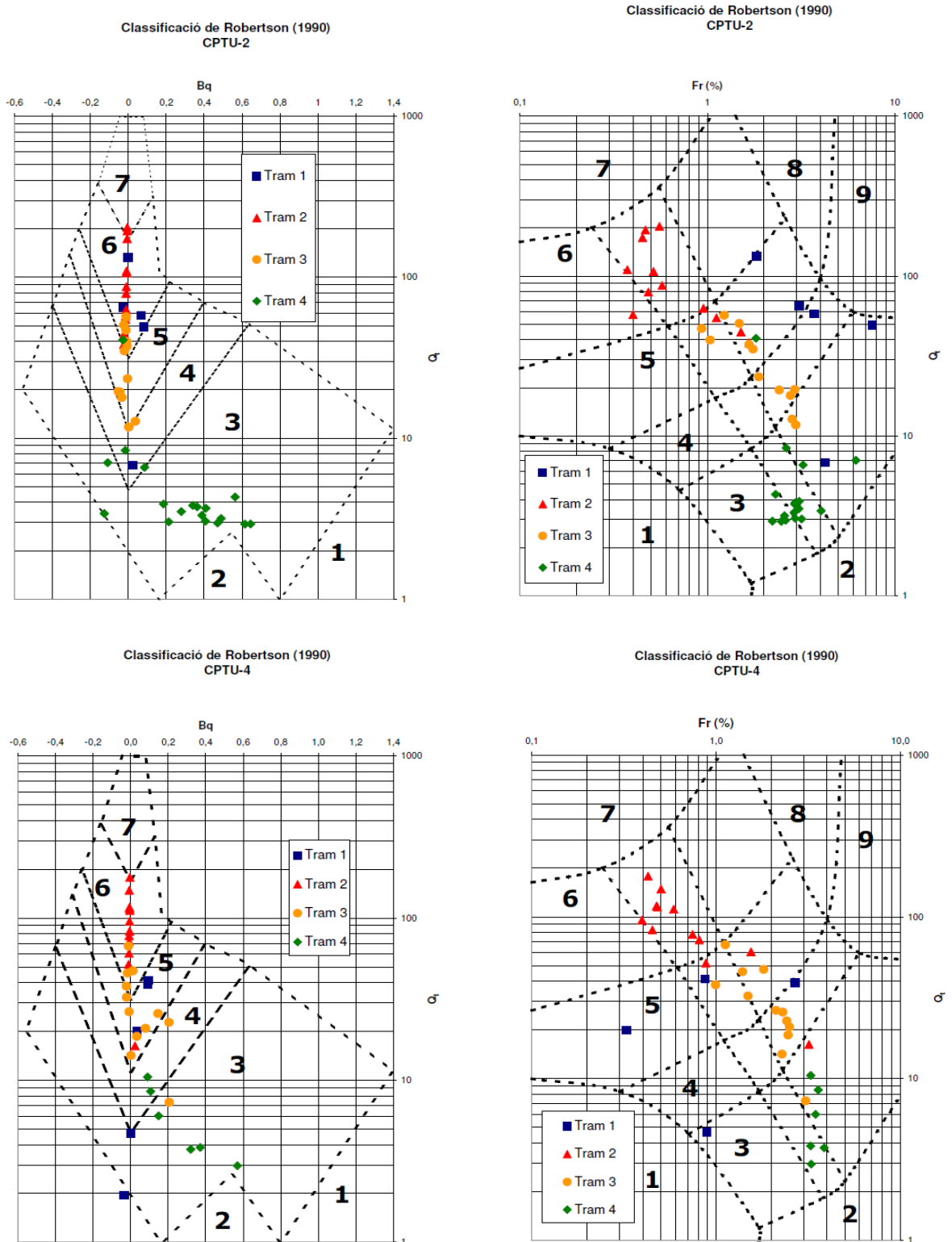
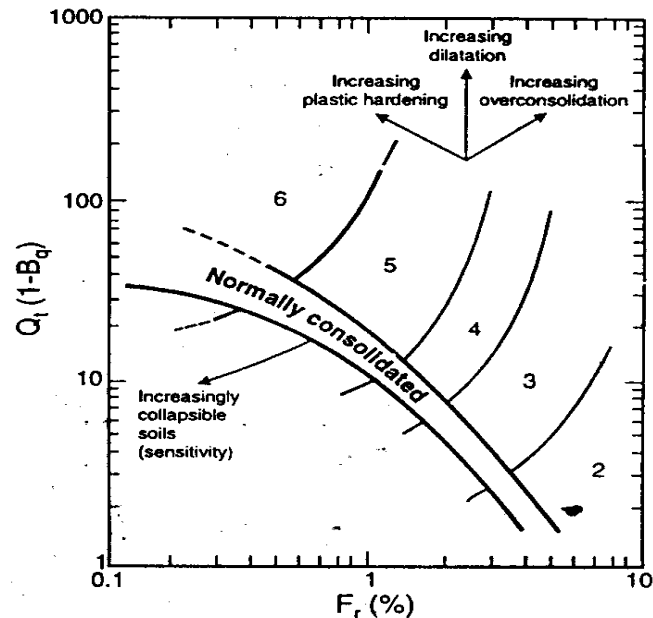


Figura 4-15. Resultats obtinguts amb la classificació de Robertson a la zona test (Robertson, 1990)

4.4.2.5 Classificació de Jefferies i Davies.

Aquesta classificació utilitza una única taula per expressar els resultats i fa servir el coeficient de pressió de porus B_q directament en una modificació de la resistència en punta normalitzada Q_t , tal i com es pot veure a la figura 4-16.



NOTES:

- | | |
|--|---|
| 1. Sensitive fine grained | 5. Sand mixtures - silty sand to sandy silt |
| 2. Organic soils - peats | 6. Sands - clean sand to silty sand |
| 3. Clays - clay to silty clay | |
| 4. Silt mixtures - clayey silt to silty clay | |

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}}$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

Figura 4-16. Classificació del sòl a partir de dades del CPTu segons Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991).

Com passa amb les classificacions de Robertson, la classificació de Jefferies i Davies utilitza una classificació pròpia del sòl, que és la que hi ha descrita en la següent Taula 4-14.

Taula 4-14. Tipus de sòl definits a la classificació de Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991).

Zona	Tipus de sòl
1	Sòls sensitius de gra fi
2	Sòls orgànics
3	Argila a argila llimosa
4	Barreja de llims; llim argilós a argila llimosa
5	Barreja de sorres; sorra llimosa a llim sorrenc
6	Sorra; sorra neta a sorra llimosa

Els resultats obtinguts són els que es mostren a la Taula 4-15 i a la figura 4 - 17.

Taula 4-15. Resultats obtinguts amb la classificació de Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991).

	CPTu-2	CPTu-4
Tram 1	Mostra una gran dispersió, estant des de la zona 5 (barreja de llims i sorres) fins a la 3 (argiles i argiles llimoses). La majoria de punts molt allunyats de la zona de materials NC, per sobre d'ella.	Només hi ha representats 4 punts d'aquest tram i estan a les zones 4 (barreja de llims i argiles) i 5 (barreja de sorres i llims). No hi ha una tendència clara respecte la zona de materials NC.
Tram 2	Dintre de les zones 5 (barreja de llims i sorres) i 6 (sorres).	Dintre de les zones 5 (barreja de llims i sorres) i 6 (sorres) i hi ha un punt a la zona 4 (barreja de llims i argiles).
Tram 3	La majoria dels punts estan a les zones 4 (barreja de llims i argiles) i 5 (barreja de sorres i llims) amb algun punt a la zona 3 (argiles i argiles llimoses).	La majoria dels punts estan a les zones 4 (barreja de llims i argiles) i 5 (barreja de sorres i llims) amb algun punt a la zona 3 (argiles i argiles llimoses).
Tram 4	Queda ben caracteritzat; la majoria de punts estan a les zones 2 (sòls orgànics) i 3 (argiles i argiles llimoses). hi ha forces punts a la zona de materials NC, però no hi ha una tendència clara respecte.	Queda ben caracteritzat; la majoria de punts estan a les zones 2 (sòls orgànics) i 3 (argiles i argiles llimoses).

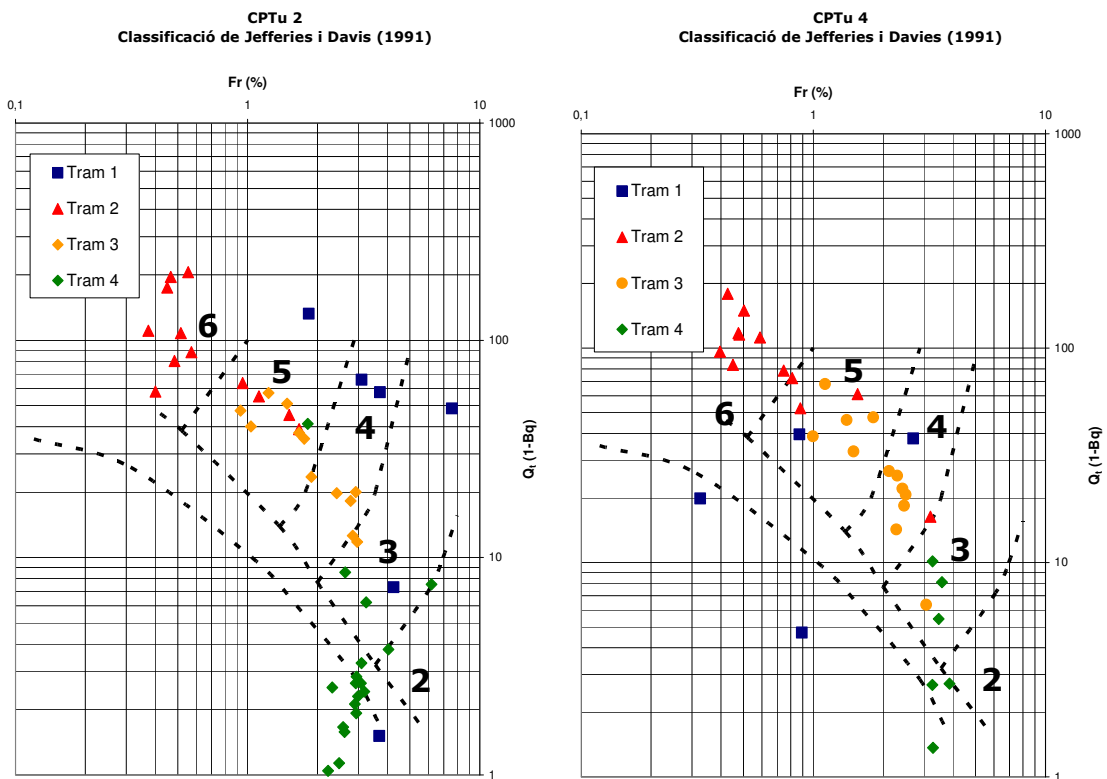


Figura 4-17. Resultats obtinguts amb la classificació de Jefferies i Davies (Jefferies i Davies, 1991). a la zona test

4.4.3 Correlacions amb paràmetres del terreny.

Tal i com ja s'ha comentat al capítol 1, els principals objectius dels assaigs de penetració estàtica són la determinació de l'estratigrafia i l'estimació d'alguns paràmetres geotècnics.

En aquest apartat es pretén mostrar i comentar algunes estimacions de paràmetres del terreny a partir de les dades obtingudes directament dels assaigs realitzats.

Cal fer algunes consideracions:

- Totes les correlacions s'han utilitzat amb la idea de caracteritzar els materials cohesius, per ser els més abundants.
- A la interpretació s'ha de tenir present que els tres assaigs estudiats han assolit fondàries diferents.
- El valor de R_f considerat per a la classificació de terrenys és diferent al CPT 3 que als piezocons, tal i com s'explica a l'apartat 4.4.1. Els valors que es fan servir a cada cas estan a la taula 4-5.

Els paràmetres que es determinen a partir de les dades dels assaigs i utilitzant correlacions empíriques són els següents:

- Sensitivitat, S_t .
- Índex de compressibilitat, C_c .
- Mòdul edomètric, E_m .
- Pressió de preconsolidació, p'_c .
- Grau de sobreconsolidació, OCR.

4.4.3.1 Sensitivitat de les argiles (S_t).

La sensitivitat de les argiles (S_t) es defineix com la relació entre la resistència al tall no drenada de l'argila original i la resistència al tall no drenada de la mostra retreballada.

Es defineixen nivells de sensitivitat de les argiles, com es veu a la Taula 4-16

Taula 4-16. Definició dels nivells de sensitivitat.

Sensitivitat (S_t) Qualificació	
2 - 4	Poc sensitiu
4 - 8	Sensitiu
8 - 16	Molt sensitiu
> 16	Argila ràpida ('Quick clay')

La correlació utilitzada la calcula a partir del coeficient de fregament R_f , i la relació és la següent (Schmertman, 1978):

$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \quad (4.11)$$

On N_s és una constant que varia entre 6 i 9. El valor que s'ha fet servir per el càlcul ha estat 7.5.

El resultat d'aplicar aquesta fórmula als assaigs estudiats és el que es presenta a la figura 4 - 18.

A la Taula 4-17 hi ha indicats els valors obtinguts amb aquesta correlació per a cada assaig estudiat. S'han considerat el valor mig i la mediana dels resultats.

Taula 4-18. Valors obtinguts amb la correlació de la sensitivitat.

Sensitivitat, S_t		Assaig considerat		
		CPT 3	CPTu 2	CPTu 4
Tots els materials	Valor mig	2.12	3.79	3.98
	Mediana	1.97	3.32	3.19
Llims superficials	Valor mig	0.96	4.86	5.29
	Mediana	0.75	1.88	3.75
Argiles inferiors total	Valor mig	2.27	3.58	3.57
	Mediana	2.05	3.41	3.12
Argiles inferiors (15 m <z<35 m)	Valor mig	2.61	3.88	3.64
	Mediana	2.76	3.67	3.21
Argiles inferiors (z>35 m)	Valor mig	1.92	3.24	2.90
	Mediana	1.93	3.37	2.83

Els resultats que s'obtenen dels CPTu són molt similars en els dos casos, amb una certa variació per als lims superficials, mentre que els resultats del CPT-3 són molt inferiors.

Els resultats dels lims superiors (tram 1) són molt rars en tots tres casos, amb molta disparitat entre els valors obtinguts.

Mirant només els CPTu, pel que fa referència a les argiles inferiors s'observa que entre els 15 i els 35 metres de profunditat (tram 3) els valors oscil·len entre 1 i 8 mentre que a partir del 35 metres (tram 4) els valors estan entre 1 i 4. Aquesta reducció en la valor de la sensitivitat amb profunditat també es veu al CPT 3, però els valors d'oscil·lació són inferiors: entre 1 i 4 pel tram 2 i entre 1 i 2 pel tram 4.

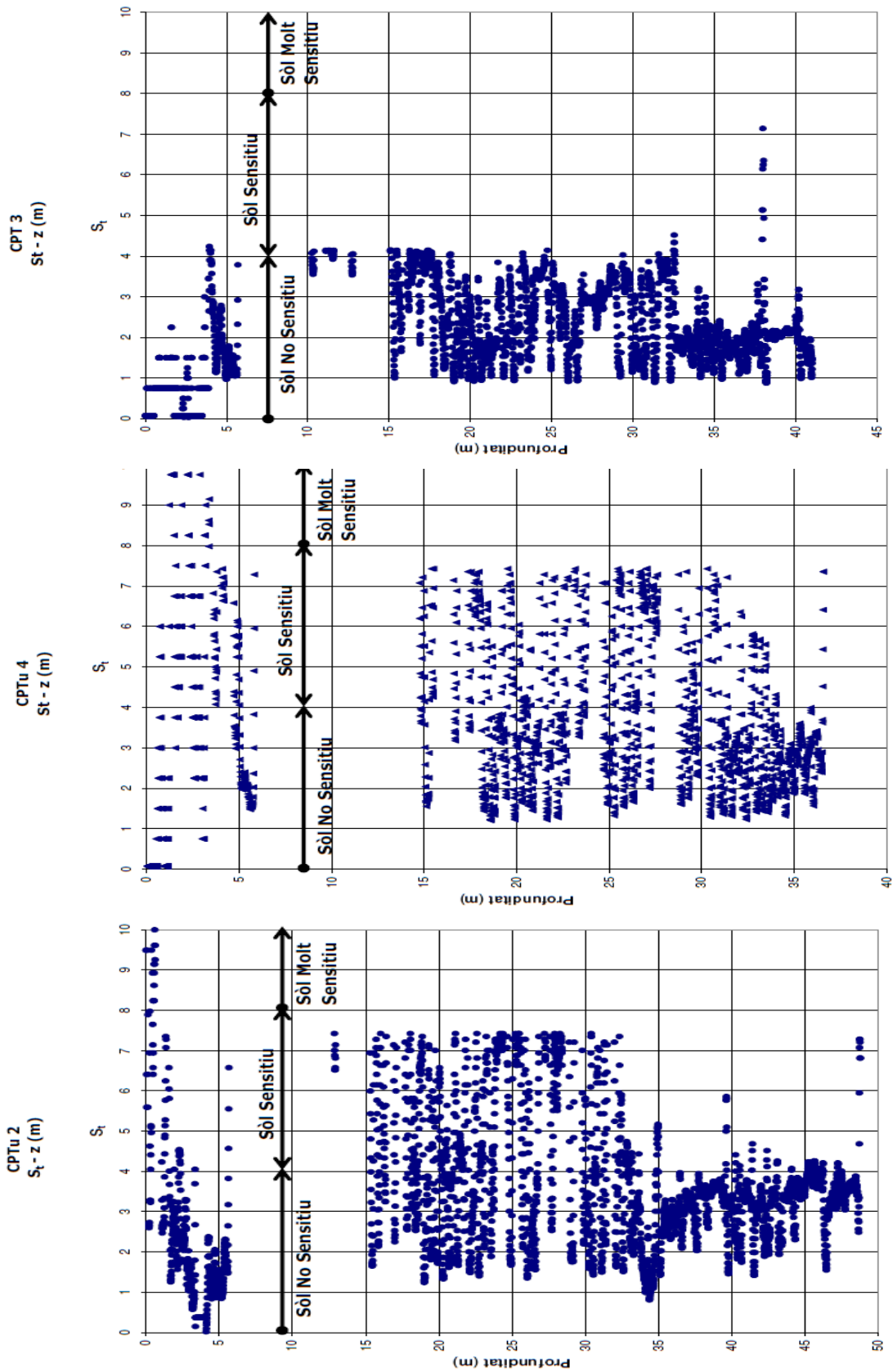


Figura 4-18. Resultat de la correlació amb la sensibilitat.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Cal tenir present que en aquesta correlació té una gran importància el valor de R_f considerat durant la classificació dels materials, ja que determina quin és el valor màxim de la sensibilitat d'aquests material. La Taula 4-19 resumeix aquesta situació.

Taula 4-19. Influència del valor de R_f en el càlcul de la sensibilitat, S_t .

Assaig	R_f [%]	S_t màxima
CPT 3	1.8	4.16
CPTu 2	1	7.5
CPTu 4		

Segons la classificació de la taula, ambdós casos corresponen a argiles sensibles encara que els valors del CPT-3 estan a prop del límit amb les argiles no sensibles.

En qualsevol cas, els resultats indiquen que es tracta de materials cohesius poc sensitius.

4.4.3.2 Index de compressibilitat (C_c).

L'índex de compressibilitat C_c és un dels paràmetres mecànics que indiquen el comportament de les argiles a compressió.

Segons Sanglerat (1972) en sòls cohesius existeix una relació entre la resistència en punta de l'assaig de penetració estàtica i l'índex de compressibilitat. Aquesta relació es reflexa en les següents equacions:

$$\text{Valor màxim: } c_c = \frac{q_c - 4.2}{6 \cdot q_c - 40} \quad (2.23)$$

$$\text{Valor mínim: } c_c = \frac{0.05 \cdot q_c}{q_c - 2} \quad (2.24)$$

Aquestes equacions determinen dues hipèrboles, de manera que el valor real de C_c ha de quedar comprès entre elles.

El resultat d'aplicar aquestes equacions és el que es veu a la figura 4-19. Observi's que els llims superficials donen valors anòmals mentre que les argiles que corresponen a l'aqüítard presenten resultats molt més regulars.

Els pics que apareixen són provocats per l'elevada rigidesa dels materials, que són argiles que contenen passades sorrenques. La presència de sorres fa que la resistència en punta q_c s'incrementi localment i per això hi ha increments de C_c en aquestes passades.

És un resultat que pot provocar confusió ja que les sorres rígides tindrien un C_c més petit.

A la Taula 4-20 hi ha indicat els valors obtinguts amb aquesta correlació per a cada assaig estudiat. S'han considerat el valor mig i la mediana dels resultats.

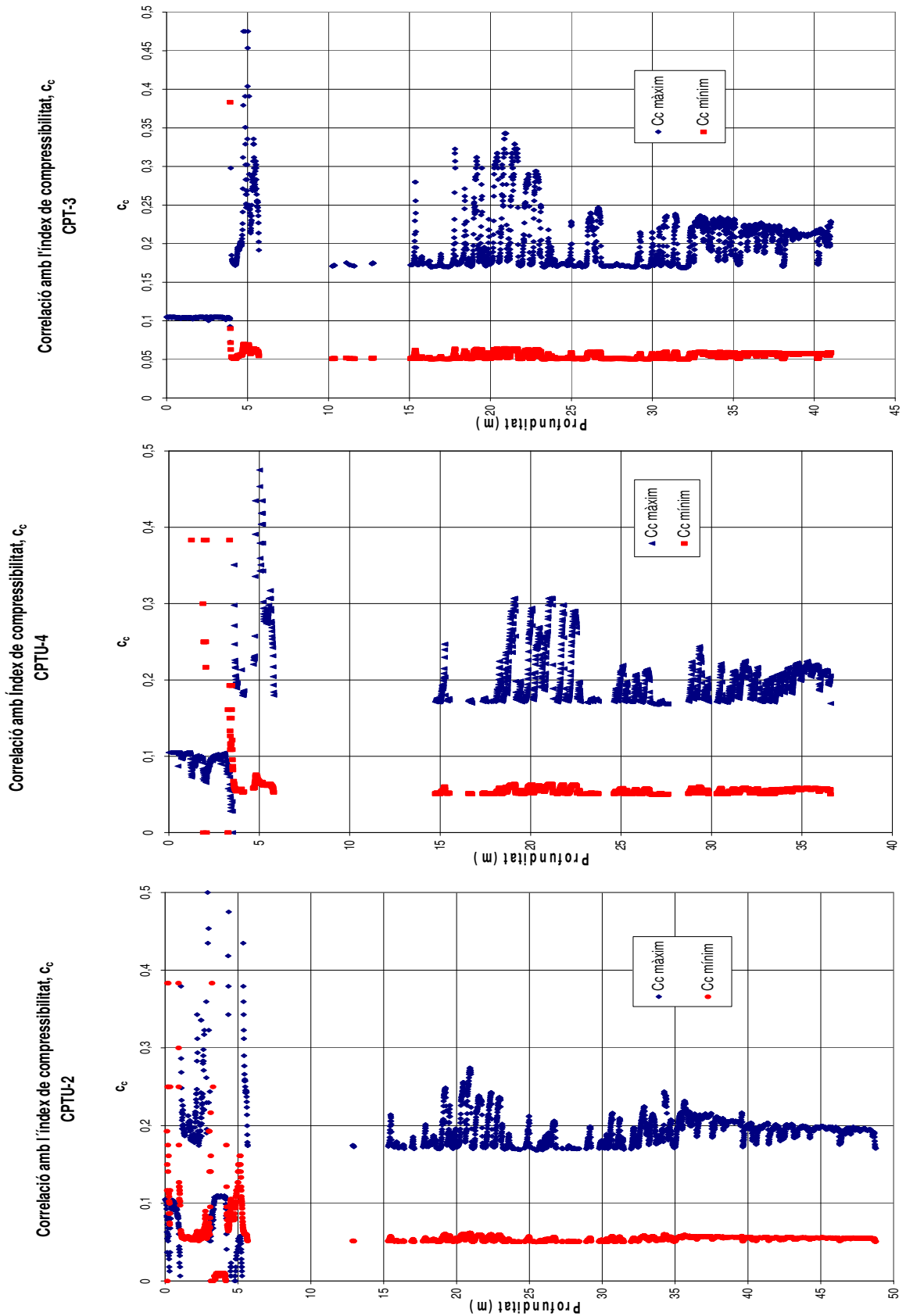


Figura 4-19. Valors màxims i mínims de C_c segons la relació de Sanglerat (1972). Per poder utilitzar aquesta correlació, cal treballar amb q_c en kp/cm^2 no en MPa

Taula 4-20 . Valors obtinguts amb la correlació de l'índex de compressibilitat (valors màxims i mínims).

Índex de compressibilitat, C_c		Assaig considerat			
		CPT 3	CPTu 2	CPTu 4	
C_c màxim	Tots els materials	Valor mig	0.196	0.197	0.184
		Mediana	0.197	0.188	0.186
	Llims superficials	Valor mig	0.152	0.213	0.134
		Mediana	0.105	0.108	0.102
	Argiles inferiors total	Valor mig	0.203	0.194	0.200
		Mediana	0.206	0.195	0.192
	Argiles inferiors (15 m <z<35 m)	Valor mig	0.196	0.189	0.199
		Mediana	0.174	0.180	0.188
	Argiles inferiors (z>35 m)	Valor mig	0.211	0.199	0.212
		Mediana	0.214	0.198	0.211
C_c mínim	Tots els materials	Valor mig	0.050	0.052	0.043
		Mediana	0.055	0.055	0.054
	Llims superficials	Valor mig	0.017	0.052	0.002
		Mediana	0	0.055	0
	Argiles inferiors total	Valor mig	0.055	0.055	0.055
		Mediana	0.056	0.055	0.055
	Argiles inferiors (15 m <z<35 m)	Valor mig	0.054	0.054	0.055
		Mediana	0.052	0.053	0.054
	Argiles inferiors (z>35 m)	Valor mig	0.057	0.056	0.057
		Mediana	0.058	0.055	0.057

Per el valor màxim els resultats per a tots el materials en conjunt i per a les argiles de l'aquíard són molt similars en els tres casos. Són remarcables els resultats obtinguts per el CPT 3 i el CPTu 4, molt similars, mentre que el valor mig resultant del CPTu 2 és molt superior als altres.

Pel que fa al valor mínim els resultats obtinguts per a les argiles inferiors són idèntics en tots els casos. Els valors dels llims superiors són molt variats; el CPTu 2 dóna resultats molt alts mentre que el CPTu 4 dóna valors molt petits. Per a la totalitat de materials els valors són força similars en tots els casos excepte el valor mig del CPTu 4, una mica baix.

Podem comparar aquests resultats amb els obtinguts a partir dels assaigs realitzat per a la precàrrega de la tercera pista de l'aeroport del Prat (Egea Kenz, C., 2004), zona molt pròxima i amb condicions similars. En fer-ho veiem que el valor de c_c obtingut per als llims superficials és de 0.13025, lleugerament inferior al c_c màxim considerat al CPTu 4. Per a les argiles inferiors, es considera característic un C_c de 0.05, lleugerament inferior al C_c mínim calculat. En tots dos casos, són valors extremadament baixos.

4.4.3.3 Mòdul edomètric (E_m).

Existeixen diverses correlacions que permeten calcular diversos paràmetres resistents del sòl a partir de les dades dels assaigs de penetració estàtica, entre ells el mòdul edomètric, E_m o M .

En general, els paràmetres resistents del sòl depenen de la història de tensions, del nivell de tensió i deformació existent, de les condicions de drenatge i de la trajectòria de tensions seguida. Tot això fa que la determinació d'aquests paràmetres sigui complicada.

Per a sòls cohesius, E_m és pot expressar com a funció de la resistència en punta corregida, q_T , segons la següent relació:

$$E_m = \alpha \cdot (q_T - \sigma_{v0}) \quad (4.12)$$

On σ_{v0} és la tensió vertical total original i α és un paràmetre que val entre 5 i 15.

A partir d'aquesta expressió, Kulhawy i Mayne (Kulhawy i Mayne, 1990) proposen una relació més concreta:

$$E_m = 8.25 \cdot (q_T - \sigma_{v0}) \quad (4.13)$$

Aquesta és la expressió que s'ha utilitzat en les correlacions dels assaigs. Els resultats es veuen a la figura 4-20.

A la Taula 4-21 hi ha els resultats obtinguts amb aquesta correlació.

Taula 4-21. Valors obtinguts amb la correlació del mòdul edomètric, en MPa.

Mòdul edomètric, E_m [MPa]		Assaig considerat	
		CPTu 2	CPTu 4
Tots els materials	Valor mig	25.13	27.37
	Mediana	16.46	13.09
Llims superficials	Valor mig	6.54	3.45
	Mediana	3.06	0.71
Argiles inferiors total	Valor mig	28.70	34.83
	Mediana	17.42	16.83
Argiles inferiors (15 m <z<35 m)	Valor mig	40.19	37.05
	Mediana	28.28	19.17
Argiles inferiors (z>35 m)	Valor mig	16.58	14.13
	Mediana	16.11	12.93

Els resultats obtinguts per als lims superiors indiquen la baixa resistència d'aquests materials, encara que els valors que s'obtenen a cada assaig són força diferents.

Les argiles inferiors presenten valors força més elevats i similars entre sí, sobretot la mediana de cada assaig. Els valors totals són força similars.

Els pics que s'observen a la gràfica corresponen a passades més sorrenques dintre dels materials cohesius.

A les zones més profundes dels assaigs, on hi ha materials cohesius, es pot veure una variació gairebé lineal del mòdul edomètric, que està relacionat amb el nivell de base de la resistència en punta que es comenta més endavant.

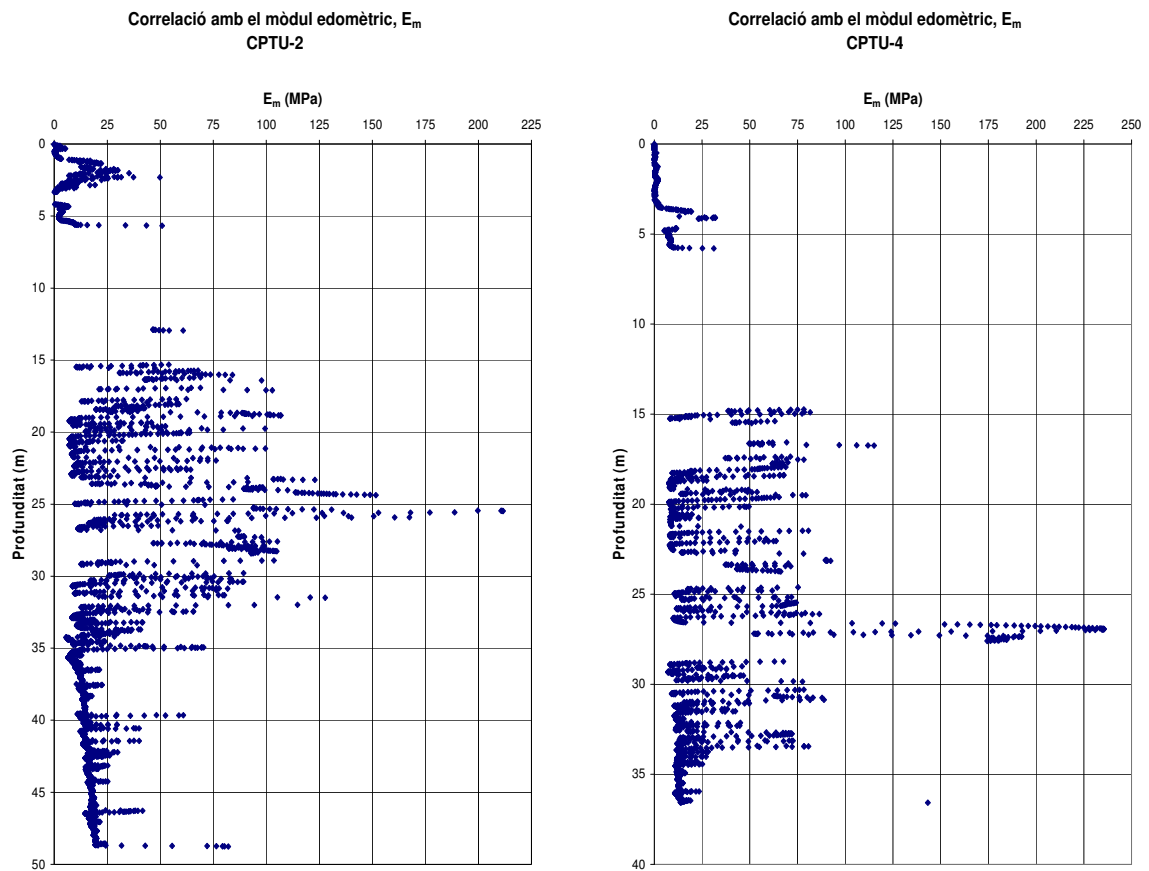


Figura 4-20. Variació del mòdul edomètric, E_m , amb la profunditat als CPTu 2 i CPTu 4.

4.4.3.4 Pressió de preconsolidació (p'_c).

La pressió de preconsolidació (p'_c) es defineix com la màxima tensió efectiva que ha actuat al terreny al llarg de la seva història geològica.

Es fàcil veure que, segons aquesta definició i amb les dades que tenim, la pressió de preconsolidació màxima es va produir quan la distribució de pressions d'aigua era mínima. De fet, la distribució de la pressió de preconsolidació coincideix amb la distribució de la pressió d'aigua en aquesta situació.

Segons Mayne i Holtz (1988), existeix una relació directa entre la pressió de preconsolidació p'_c i l'excés de pressió de porus Δu . Aquesta relació es reflexa en la següent fórmula:

$$p'_c = \frac{\Delta u}{\delta} \quad (4.13)$$

On δ és una constant que val 1 per a argiles sensibles i 4 per a argiles no sensibles. S'ha considerat que els materials cohesius existents en el terreny no són sensibles, a la vista dels resultats obtinguts i comentats a l'apartat anterior.

Per la pròpia naturalesa de la correlació es veu que només és aplicable amb resultats de CPTu, perquè són els proporcionen dades de pressió d'aigua en el terreny.

Els resultats es veuen a la figura 4 - 21 i a la Taula 4-22, on hi ha els valors obtinguts amb aquesta correlació. S'han considerat el valor mig i la mediana dels resultats.

Taula 4-22. Valors obtinguts amb la correlació de la pressió de preconsolidació, en MPa.

Pressió de preconsolidació, p'_c [MPa]		Assaig considerat	
		CPTu 2	CPTu 4
Tots els materials	Valor mig	0.043	0.024
	Mediana	0	0
Llims superficials	Valor mig	0	0.008
	Mediana	0	0
Argiles inferiors total	Valor mig	0.052	0.029
	Mediana	0.003	0.003
Argiles inferiors (15 m <z<35 m)	Valor mig	-0.015	0.018
	Mediana	-0.022	-0.005
Argiles inferiors (z>35 m)	Valor mig	0.123	0.129
	Mediana	0.137	0.143

Val a dir que aquests valors són molt baixos si els comparem amb una situació hidrostàtica normal. Si considerem un pes específic del terreny de 2 t/m³ i una situació hidrostàtica, la tensió efectiva a 25 m de profunditat és de 250 KPa (25 t/m²) un valor molt superior als 52 KPa que s'obtenen com a valor mig al CPTu 2.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

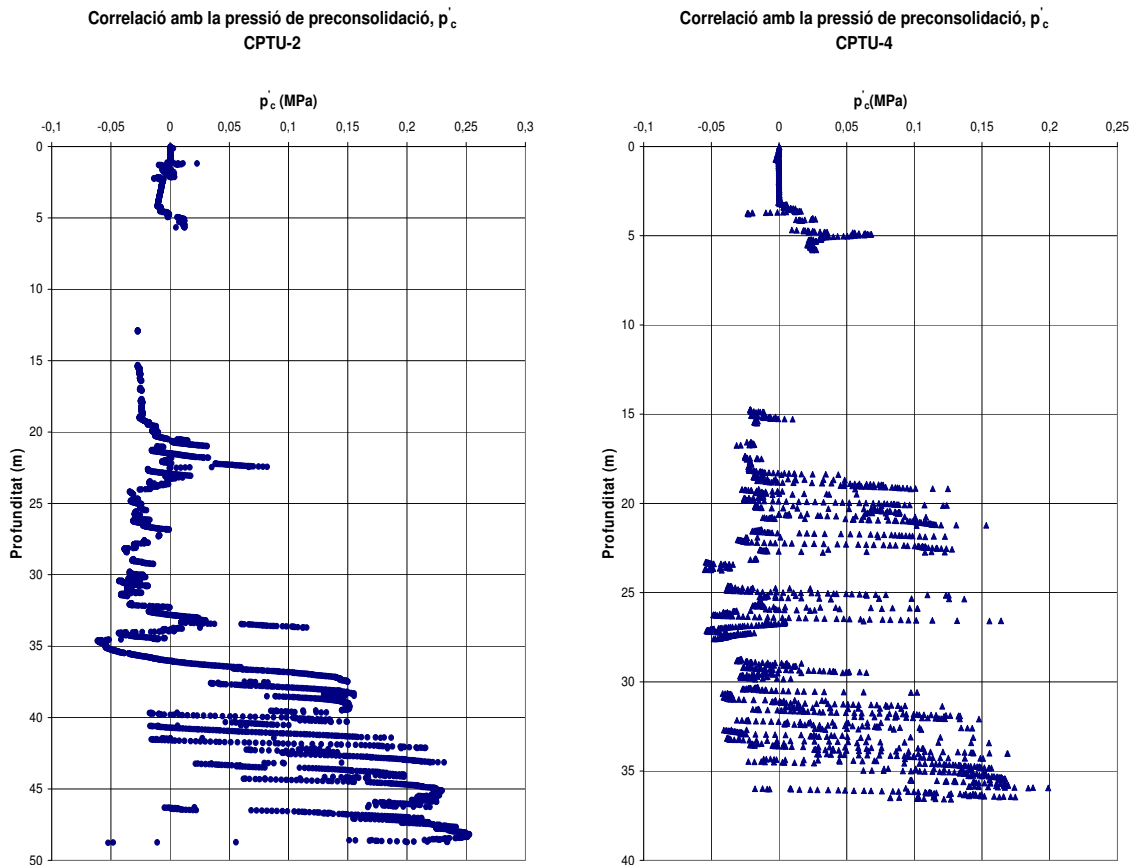


Figura 4-21. Correlació de les dades del CPTU amb la pressió de preconsolidació.

Els resultats obtinguts són molt diferents excepte en el cas dels llims superficials, que semblen no ser afectats per variacions de la pressió d'aigua.

És molt possible que la diferència de profunditat entre ambdós assaigs influeix comparació, així com el fet que s'utilitzi la pressió de porus u_2 durant el càlcul que, com ja s'ha comentat, no ofereix gaire confiança.

El que sí que es mostra amb molta claredat és un canvi de comportament dels materials amb la profunditat. A partir dels 30 metres al CPTu 2 i als 18 metres al CPTu 4, els valors de p_c s'incrementen de manera molt important assolint valors superiors als 200 KPa (20 t/m²) al CPTu 2 i als 150 KPa (15 t/m²) al CPTu 2.

Malgrat tot i com ja s'ha dit, els valors són molt inferiors als que correspondria a una situació hidrostàtica normal.

4.4.3.5 Correlacions amb el grau de sobreconsolidació (OCR).

El grau de sobreconsolidació (OCR) es defineix com la relació entre la tensió efectiva màxima que ha actuat sobre el sòl i la tensió efectiva actual en el terreny.

Aquest és un paràmetre difícil de determinar en la zona estudiada perquè depèn de les tensions efectives i , en conseqüència, de les condicions hidràuliques del sòl. Tal i com ja s'ha dit, l'aquífer inferior del delta del Llobregat ha estat sobreexplotat històricament i això ha provocat importants variacions en les tensions efectives.

Una primera aproximació a l'OCR dels materials analitzats ens la pot proporcionar l'anàlisi del paràmetre B_q ja que, per definició, està estretament relacionat amb la història tensional del terreny i amb la pressió d'aigua. Representant la variació de B_q amb la profunditat, i sabent que el paràmetre B_q en terrenys SC té valor nul o negatiu (com és fàcilment deduïble de les taules de les classificacions de Robertson on està indicat que l'OCR creix a mida que B_q s'acosta a l'origen de coordenades) obtenim una aproximació a la variació de l'OCR.

A la figura 4-22 hi ha representada aquesta relació pels CPTu 2 i CPTu 4.

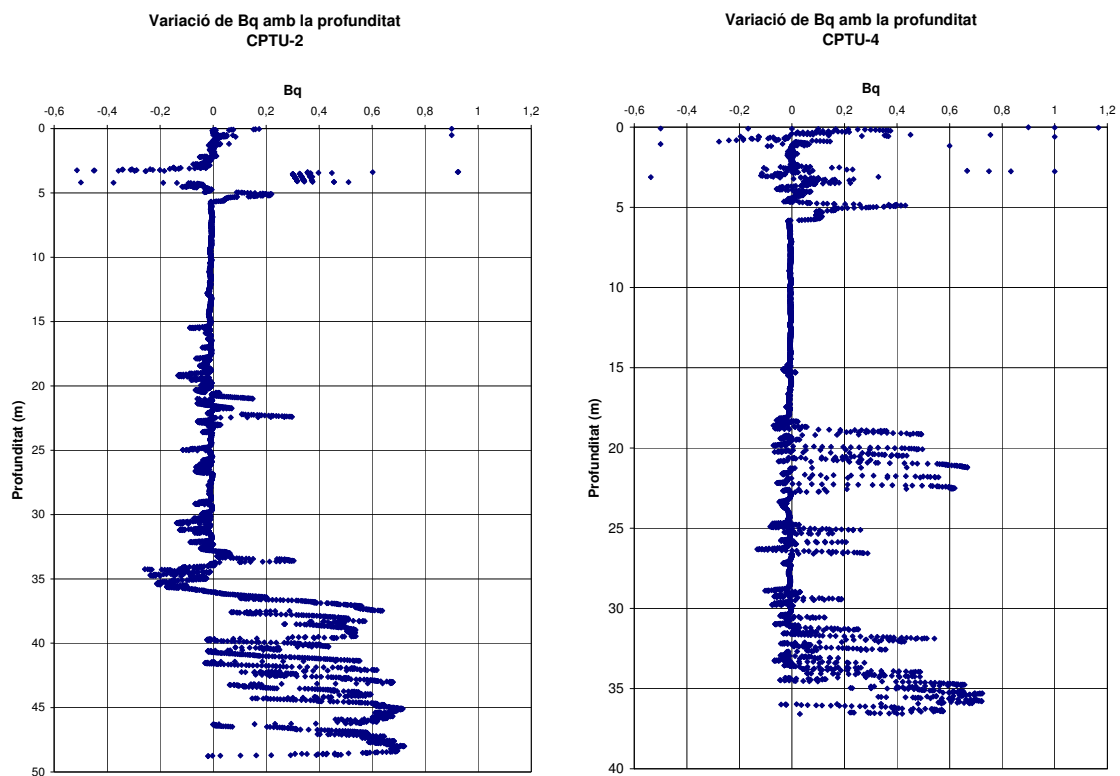


Figura 4-22. Representació de la variació de B_q amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

A tots dos casos ignorem els 5 primers metres de penetració. Al CPTu 2 els valors de B_q són negatius o nuls fins als 36 m de fondària mentre que al CPTu 4, aquests valors només es donen fins al 18 m. Per sota d'aquestes profunditats els valors de B_q són positius, el que indicaria la presència de materials NC.

Cal tenir present que el paràmetre B_q depèn de la pressió u_2 i que aquest valor presenta alguns problemes, que ja s'han comentat, de manera que cal considerar aquests resultats com merament informatius.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Podem calcular l'OCR real si suposem una situació hidrostàtica. Una altra forma de fer-ho és a partir dels valors de p'_c obtinguts a l'apartat anterior però els resultats que s'obtingrien no serien bons perquè la pressió de preconsolidació que s'han determinat són molt inferiors als que correspondria a una situació hidrostàtica i obtindríem valors inferiors a 1, fins i tot negatius, que són impossibles donada la pròpia definició de l'OCR.

Existeixen diverses correlacions entre les dades obtingudes a través dels assaigs de penetració estàtica i l'OCR. S'ha de tenir present que, per la pròpia definició de l'OCR, aquest un valor mínim de 1.

Es determina quins valors o relacions de valors de les dades són necessaris per a què la correlació amb l'OCR sigui vàlida, és a dir, el resultat obtingut és més gran o igual a 1. Les correlacions utilitzades i les condicions de validesa de cadascuna es veuen a la Taula 4-23 i a la Taula 4-24, respectivament.

Taula 4-23. Correlacions de l'OCR amb dades dels assaigs de penetració estàtica que s'han utilitzat.

Nomenclatura i autor	Correlació
OCR 1 (Chang ,1991)	$OCR = \frac{2.3B_q}{3.7B_q - 1} \quad (4.14)$
OCR 2 (Mayne, 1991)	$OCR = 2 \left[\frac{1}{1.95M + 1} \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'} \right) \right]^{1.33} \quad (4.15)$
OCR 3 (Mayne i Holtz, 1988)	$OCR = \left(0.317 \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \right)^{1.79} \quad (4.16)$
OCR 4 (Mayne i Bachus, 1988)	$OCR = 0.38 \left(\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} - 1 \right)^{1.33} \quad (4.17)$
OCR 5 (Lunne et at, 1997)	$OCR = k \left(\frac{q_t - \sigma'_v}{\sigma'_v} \right) \quad (4.18)$

Taula 4-24. Condicions de validesa de les correlacions utilitzades.

Nomenclatura i autor	Condicció de validesa
OCR 1 (Chang ,1991)	$B_q \leq 0.714 \quad (4.19)$
OCR 2 (Mayne, 1991)	$\frac{q_t - u_2}{\sigma'} \geq 0.594 \cdot (1.95M + 1) \quad (4.20)$
OCR 3 (Mayne i Holtz, 1988)	$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \geq 3.155 \quad (4.21)$
OCR 4 (Mayne i Bachus, 1988)	$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \geq 3.07 \quad (4.22)$
OCR 5 (Lunne et at, 1997)	$\frac{q_t - \sigma'_v}{\sigma'_v} \geq \frac{1}{k} \quad (4.23)$

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

A la correlació OCR 2 es fa servir el paràmetre M, que és el pendent de la recta d'estat crític del model de Cam – Clay. Aquest paràmetre té el següent valor:

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (4.24)$$

On ϕ' és l'angle de fregament intern del material considerat. Per als materials considerats, es prenen dos valors de ϕ' , 28° i 30°.

Per a la correlació OCR 5, cal fixar el paràmetre k, que segons Lunne (Lunne et al, 1997) val entre 0.2 i 0.5.

A la Taula 4-25 es mostren, per a cada piezocon considerat, el número de punts de l'assaig que verifiquen la condició de validesa de cada correlació i els valors obtinguts. Com en anteriors apartats es presenten el valor mig i la mediana de cada correlació.

Taula 4-25. Punts on són vàlides les correlacions anteriors i resultats obtinguts (valor mig i mediana).

Assaig	Correlació	Nº punts útils	OCR	
			Valor mig	Mediana
CPTu-2	OCR 1	1006	3.33	1.29
	OCR 2 ($\phi' = 28^\circ$)	3571	240.73	140.38
	OCR 2 ($\phi' = 30^\circ$)	3571	217.83	127.03
	OCR 3	7	4.31	4.89
	OCR 4	7	4.11	4.73
	OCR 5 (k= 0.2)	3144	12.94	9.91
OCR 5 (k= 0.5)	4761	21.94	9.21	
CPTu-4	OCR 1	413	2.87	1.52
	OCR 2 ($\phi' = 28^\circ$)	3477	197.80	109.53
	OCR 2 ($\phi' = 30^\circ$)	3454	180.17	100.53
	OCR 3	26	2.15	1.97
	OCR 4	26	2.23	2.09
	OCR 5 (k= 0.2)	2757	12.3	10.5
OCR 5 (k= 0.5)	3472	24.78	17.98	

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

OCR 1.

La validesa de la fórmula en els dos assaigs estudiats és limitada, sobretot per al CPTu-4. La distribució de resultats segons la profunditat es veu a la figura 4-23.

Segons Chang (Chang,1990) aquesta correlació és aplicable a argiles recents de sensibilitat mitja a alta ($S_t \leq 8$) i amb OCR no superior a 8.

A més a més, depèn del coeficient de pressió de porus, B_q , és a dir, que depèn de la pressió de porus u_2 mesurada durant la realització de l'assaig, amb tot el que ja s'ha comentat sobre aquesta dada. Tot i això, els resultats que s'obtenen semblen correctes, principalment la mediana encara que s'ha de tenir present els pocs punts vàlids.

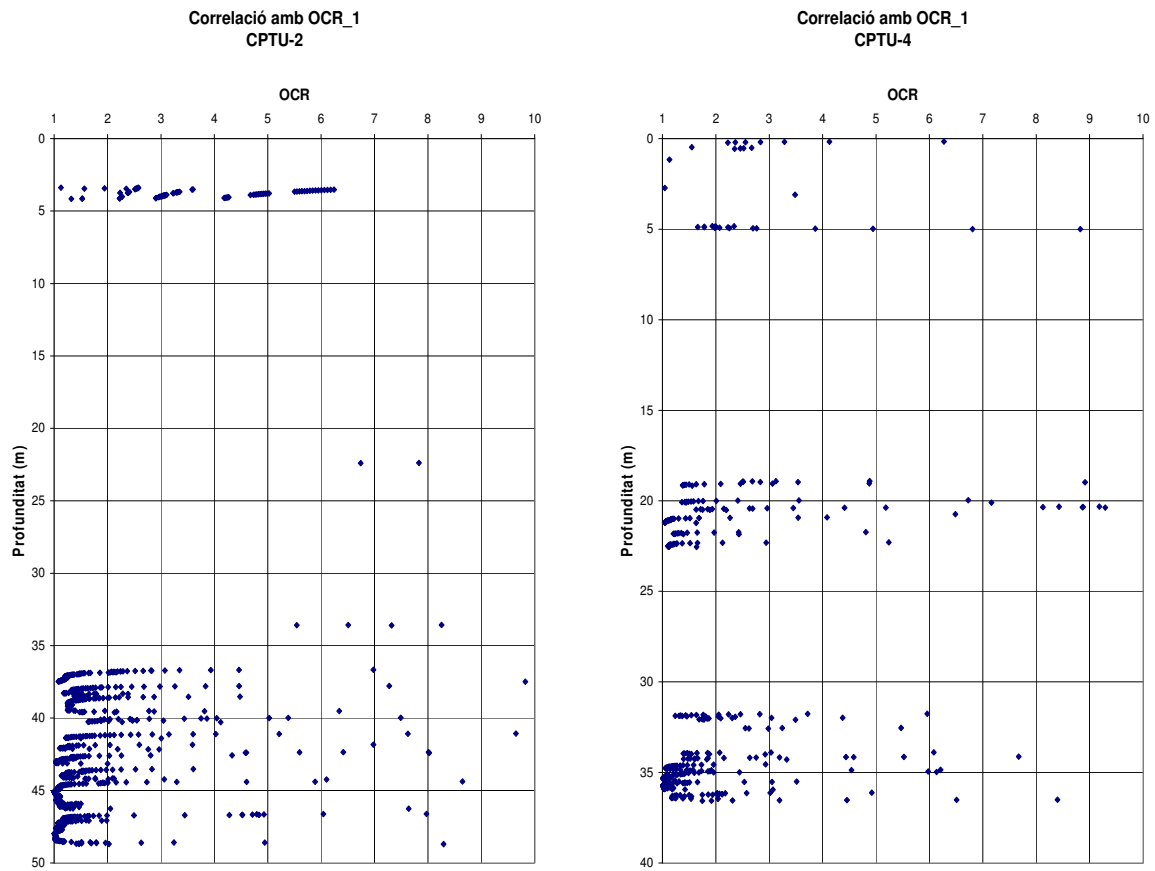


Figura 4-23. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_1 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

OCR 2.

El número de punts on es vàlida aquesta correlació és prou important en tots dos assaigs; una mica més al CPTU 4. A la figura 4-24 hi ha la distribució dels valors obtinguts amb la profunditat. S'ha fet servir l'escala logarítmica per a representar tots els punts.

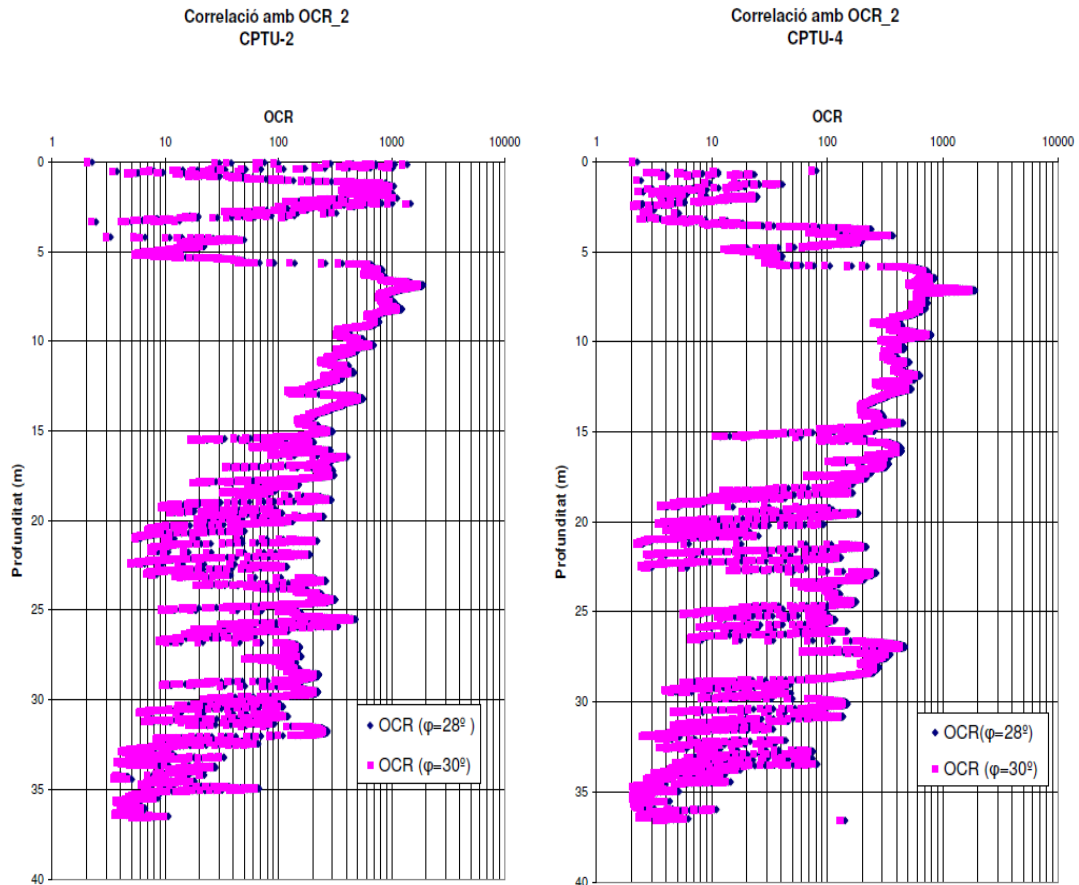


Figura 4-24. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_2 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

La diferència entre les dues sèries de punts representades està en el valor de l'angle de fregament intern considerat a l'hora de calcular el paràmetre M_r . En un cas s'ha considerat $\phi' = 28^\circ$ i per a l'altre $\phi' = 30^\circ$.

Els valors que s'obtenen són molt dolents, sigui quin sigui el valor de ϕ' considerat. Una possible explicació està en el fet que la correlació depèn molt dels valors de u_2 .

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

OCR 3 i OCR 4.

Les correlacions aquí utilitzades són molt similars, per això es comenten juntes. A més a més, el rang de validesa de totes dues correlacions és molt limitat i els resultats que s'obtenen no són representatius.

Com ja passa a d'altres casos, aquestes correlacions depenen del paràmetre u_2 .

La majoria de resultats pertanyen al tram de llims superiors; al CPTU 4 hi ha una important concentració de valors al voltant dels 5 metres de fondària que, segons la classificació del terreny, correspon a un tram de sorres i argiles barrejades.

A les figures següents, figura 4-25 i figura 4-26, hi ha els resultats obtinguts en funció de la profunditat.

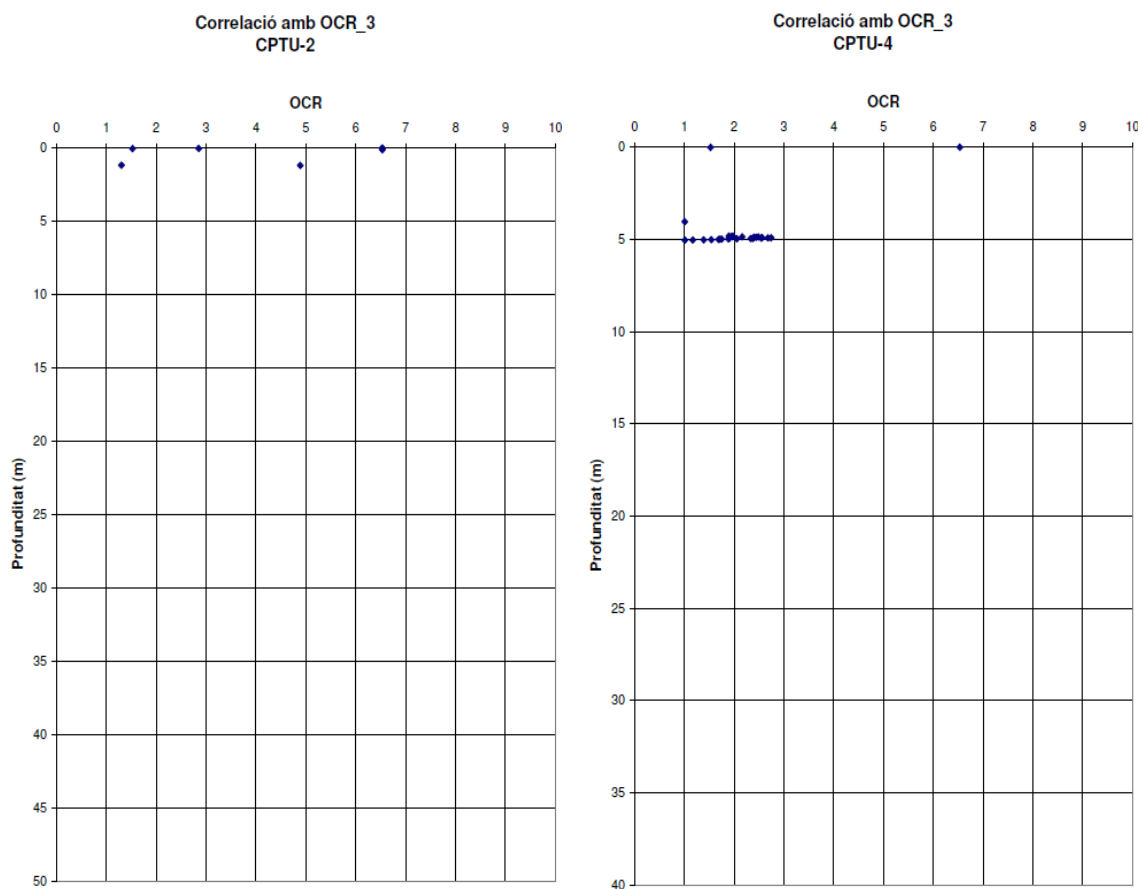


Figura 4-25. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_3 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

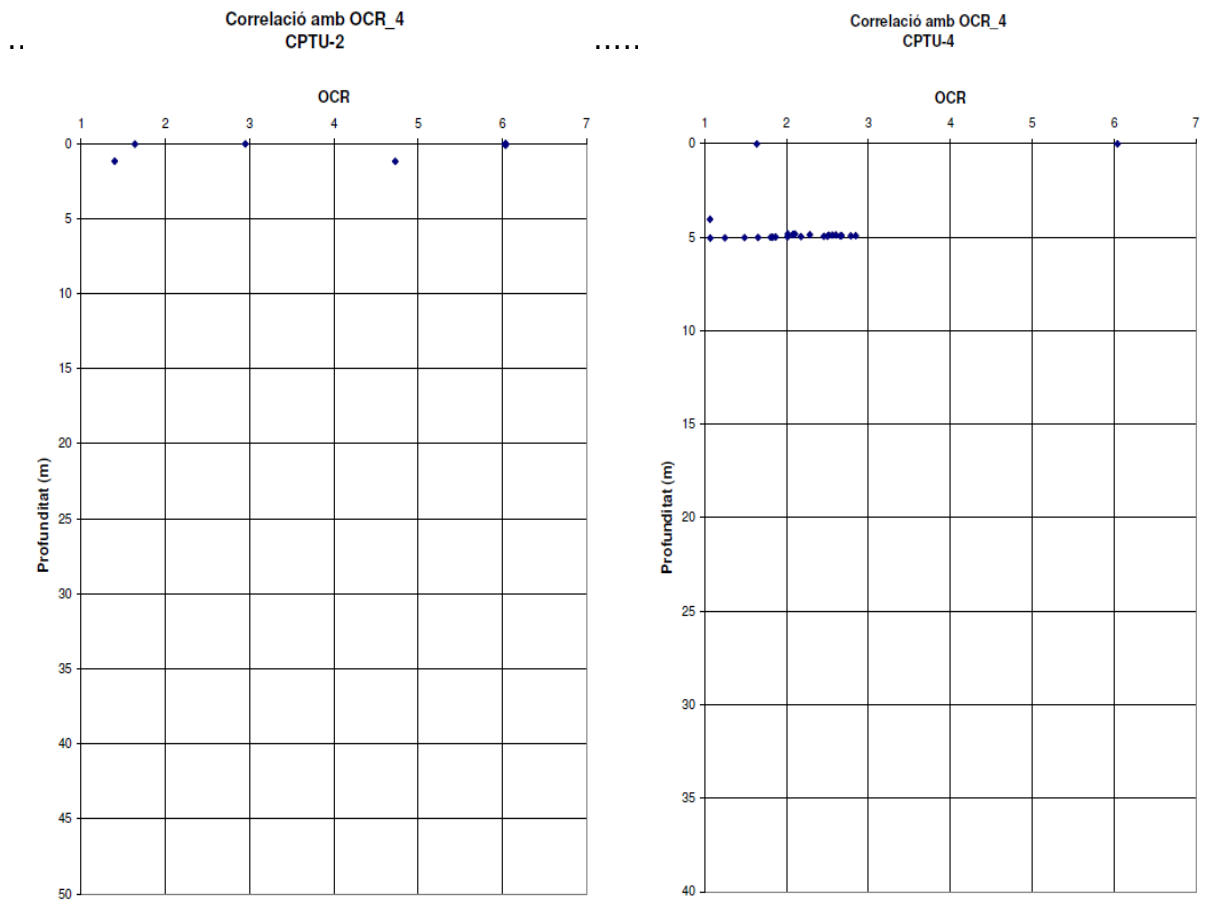


Figura 4-26. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_4 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

OCR 5.

Aquestes són les correlacions menys restrictives per a determinar l'OCR. La diferència entre ambdues està en el valor del paràmetre adimensional k considerat a cada cas; a OCR 6, k val 0.2 i a OCR 7, 0.5.

Els rangs de validesa per als dos assaigs considerats són molt amplis però els resultats no són bons. Les dues gràfiques resultants s'han representat juntes perquè el paràmetre k actua com un factor d'escala entre ambdues correlacions; la correlació amb $k=0.5$ dona valors superiors.

Els resultats que s'obtenen no són bons. De l'anàlisi de la figura 4-27 es desprèn que els resultats milloren amb la profunditat, principalment a les zones inferiors d'ambdós assaigs, a partir dels 35 m al CPTu 2 i dels 32 metres al CPTu 4. Una possible explicació a aquest fet és que aquests materials són cohesius purs, sense gaire bé cap passada sorrenca, com es pot veure a l'apartat de classificació del terreny.

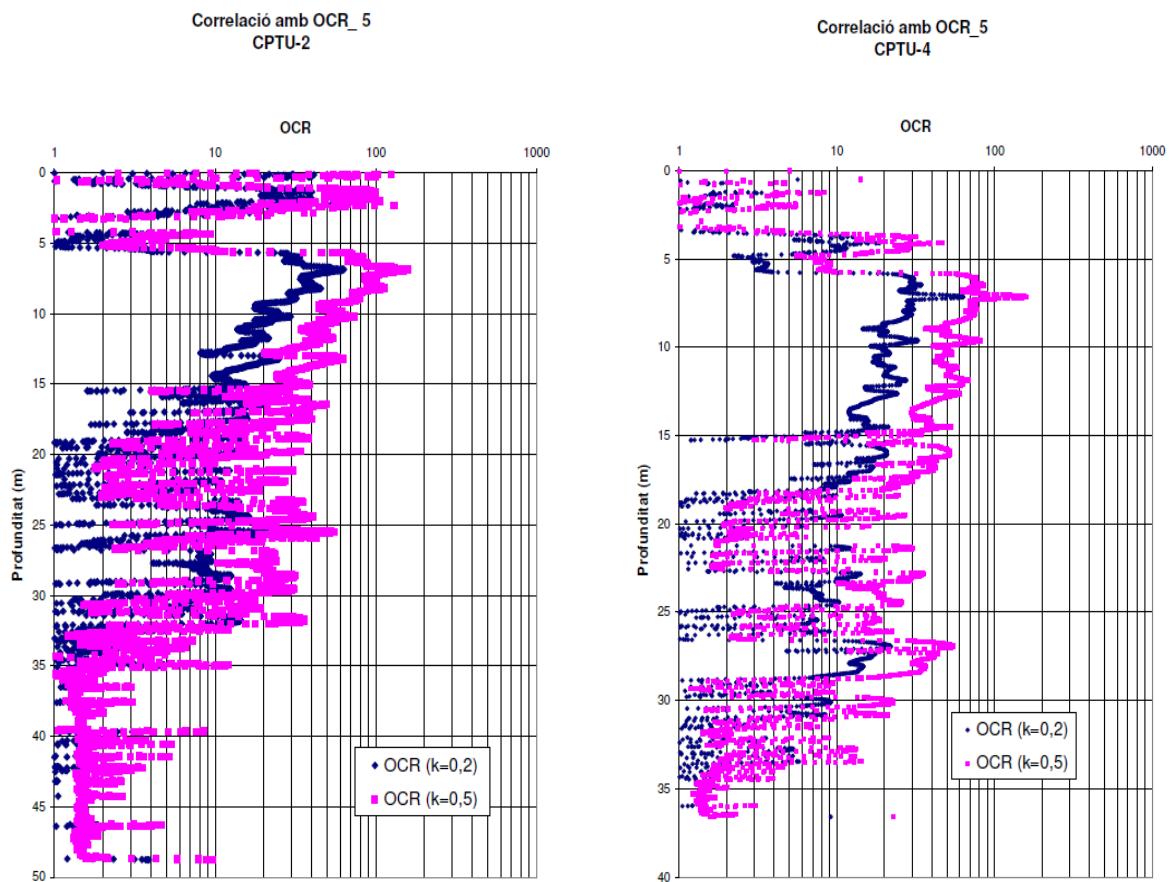


Figura 4-27. Representació de la variació de l'OCR calculat amb la correlació OCR_5 amb la profunditat pels CPTu 2 i CPTu 4.

4.5 Proposta de classificació dels materials del Delta del Llobregat.

Tal i com es veu als apartats anteriors d'aquest treball, la interpretació directa de les dades dels assaigs de penetració estàtica a partir de classificacions ja definides o de fórmules empíriques no proporciona informació prou acurada.

Per això es considera convenient realitzar una classificació pròpia per als materials estudiats. Aquesta classificació es basa en els resultats obtinguts a la zona test de la precàrrega i l'estudi de les gràfiques dels assaigs estudiats es el que proporciona els criteris particulars que es faran servir a l'hora de diferenciar els materials presents al terreny.

Com ja es diu a l'apartat 4.3.1. d'aquest treball, els criteris bàsics de classificació de materials a partir de les dades obtingudes pels assaigs de penetració estàtica són els expressats a la Taula 4-26.

Taula 4-27. Criteris per a la classificació dels materials.

	Resistència en punta, q_c (MPa)	Coefficient de fregament, R_f (%)	Pressió de porus, u_2 (MPa)
Materials drenats	Valors alts	Valors baixos	Valors inferiors a la pressió hidrostàtica.
Materials no drenats	Valors baixos	Valors alts	Valors superiors a la pressió hidrostàtica.

Les dades bàsiques son els resultats dels CPT i CPTu's fets i que estan representats a les figures 2-5, 2-6 i 2-7. A més a més, s'han aplicat les consideracions que es descriuen a l'apartat 2.3.1. d'aquest treball referents a la resistència en punta, q_{cT} i al coeficient de fregament, R_f .

Els resultats obtinguts en comenten als apartats següents.

4.5.1 Resultats del CPT 3.

Els primers 4 metres presenten una q_c molt baixa i una R_f molt elevada. Per sota i fins als 6 metres hi ha material argilós amb alguna passada de material granular. Aquesta zona correspon als materials de rebliment més superficial.

A partir dels 6 i fins als 20 metres de fondària, el material és granular com indiquen l'elevada q_c i la baixa R_f . Entre els 15 i 20 metres hi ha un notable increment de les passades cohesives.

Des del 20 metres fins al final, hi ha un clar predomini dels materials cohesius encara que a partir dels 25 metres de fondària hi ha importants intercalacions granulars.

4.5.2 Resultats del CPTu 2.

Fins als 6 metres de fondària aproximadament, el material correspon als llims i als rebliments superiors.

A partir dels 6 metres i fins als 18 metres, hi ha un important paquet de materials granulars, amb intercalacions cohesives més abundants a la base del tram.

Des dels 18 metres fins al final de l'assaig, els materials que predominen són cohesius encara que fins als 33 metres hi ha importants intercalacions granulars, que pràcticament desapareixen d'aquí fins al final.

Es destacable que a la gràfica u – profunditat, entre 5 i 10 metres de fondària, hi ha succions però el material és granular.

4.5.3 Resultats del CPTu 4.

Els primers 6 metres corresponen als materials de rebliment; a l'igual que al CPT 3, els valors de q_c són molt baixos i el de R_f extremadament elevats.

A partir dels 6 i fins als 18 metres de fondària, el material és granular amb algunes intercalacions cohesives cap a la base.

Per sota dels 18 metres i fins al final, els materials més abundants són els cohesius en cara que entre els 27 i els 30 metres de fondària hi ha una important intercalació granular.

Cal destacar que aquest assaig és força més curt que els altres dos de la mateixa zona.

4.5.4 Resum de la zona test de la precàrrega.

A partir d'aquesta classificació podem dir el següent:

- Els primers sis metres són principalment cohesius, amb alguna intercalació de material granular, molt més abundant cap a la base. Els valors de q_c són baixos excepte on hi ha material granular, més rígid.
- Entre els 6 i els 15 metres, dominen els materials granulars.
- A partir de 15 metres i fins al 30 metres, dominen els materials cohesius amb inclusions sorrenques,
- A partir dels 30 metres de profunditat, els materials són cohesius amb molt poca presència de sorres, que estan sobretot a la part superior.

Els resultats d'aquesta classificació aplicada als assaigs de la zona test es poden veure en les taules següents: Taula 4 – 24, Taula 4–29 i Taula 4–26.

Taula 4-28. Resultat de la classificació de materials per al CPTu 2.

Tram	H sorra [m]	H argila [m]	q_c mig sorres [MPa]	q_c mig argiles [MPa]
1	0,00	1,00	0,00000	0,16183
2	0,24	0,76	1,65125	2,19092
3	0,00	1,00	0,00000	1,59280
4	0,00	1,00	0,00000	0,07390
5	0,00	1,00	0,00000	0,39650
6	0,33	0,67	8,51364	0,94985
7	1,00	0,00	13,57310	0,00000
8	1,00	0,00	14,68780	0,00000
9	1,00	0,00	14,87000	0,00000
10	1,00	0,00	10,57620	0,00000
11	1,00	0,00	11,38170	0,00000
12	1,00	0,00	10,29600	0,00000
13	0,92	0,08	8,40467	6,35750
14	1,00	0,00	12,97860	0,00000
15	1,00	0,00	8,61450	0,00000
16	0,46	0,54	9,51717	5,22130
17	0,67	0,33	12,64314	7,00546
18	0,65	0,35	12,31415	5,12629
19	0,07	0,93	8,96429	6,55086
20	0,06	0,94	11,86000	3,33447
21	0,00	1,00	0,00000	2,54860
22	0,16	0,84	11,12125	3,90833
23	0,06	0,94	8,30667	2,74075
24	0,18	0,82	14,49333	7,44573
25	0,43	0,57	16,21698	9,14281
26	0,39	0,61	17,24744	12,53672
27	0,16	0,84	11,82000	3,80726
28	0,51	0,49	12,08137	10,12959
29	0,56	0,44	15,71679	10,91000
30	0,54	0,46	15,97074	4,45109
31	0,12	0,88	11,59250	5,69386
32	0,49	0,51	21,30367	5,79118
33	0,03	0,97	6,50667	3,19959
34	0,00	1,00	0,00000	2,78510
35	0,00	1,00	0,00000	3,10270
36	0,00	1,00	0,00000	1,87670
37	0,00	1,00	0,00000	1,72620
38	0,00	1,00	0,00000	1,74880
39	0,00	1,00	0,00000	1,74560
40	0,00	1,00	0,00000	2,17190
41	0,00	1,00	0,00000	2,29120
42	0,00	1,00	0,00000	2,16240
43	0,00	1,00	0,00000	2,24560
44	0,00	1,00	0,00000	2,16070
45	0,00	1,00	0,00000	2,11850
46	0,00	1,00	0,00000	2,02110
47	0,00	1,00	0,00000	2,53490
48	0,00	1,00	0,00000	2,12060
49	0,00	0,77	0,00000	2,86429

Gruix total sorra:	15,03	m
Gruix total argila:	33,74	m

Taula 4-29. Resultat de la classificació de materials per al CPTu 4.

Tram	H sorra [m]	H argila [m]	q_c mig sorres [MPa]	q_c mig argiles [MPa]
1	0,00	1,00	0,00000	0,01393
2	0,00	1,00	0,00000	0,10010
3	0,00	1,00	0,00000	0,08670
4	0,25	0,75	1,44160	0,59907
5	0,57	0,43	2,23351	1,39651
6	0,20	0,80	7,35850	1,07350
7	1,00	0,00	9,79490	0,00000
8	1,00	0,00	13,42200	0,00000
9	1,00	0,00	10,02070	0,00000
10	1,00	0,00	11,13230	0,00000
11	1,00	0,00	10,23390	0,00000
12	1,00	0,00	13,07650	0,00000
13	1,00	0,00	12,61570	0,00000
14	1,00	0,00	9,33800	0,00000
15	0,79	0,21	11,52570	7,62571
16	0,60	0,40	13,84317	3,75075
17	0,81	0,19	14,19889	8,52895
18	0,62	0,38	10,59968	7,52079
19	0,00	1,00	0,00000	3,00460
20	0,09	0,91	9,37333	3,51286
21	0,00	1,00	0,00000	1,69700
22	0,30	0,70	10,47500	2,51071
23	0,30	0,70	13,19367	2,73329
24	0,56	0,44	10,06822	7,36182
25	0,63	0,37	10,43413	3,83324
26	0,09	0,91	9,46556	4,55758
27	0,07	0,93	14,03857	12,58226
28	0,44	0,56	18,92250	18,13089
29	0,75	0,25	16,53547	3,21560
30	0,17	0,83	11,20118	3,32952
31	0,42	0,58	12,55143	5,55448
32	0,02	0,98	3,22000	2,38663
33	0,04	0,96	5,23250	3,90458
34	0,00	1,00	0,00000	3,41850
35	0,00	1,00	0,00000	1,84300
36	0,00	1,00	0,00000	1,58600
37	0,00	0,58	0,00000	1,97845

Gruix total sorra:	15,72	m
Gruix total argila:	20,86	m

Taula 4-30. Resultat de la classificació de materials per al CPT 3.

Tram	H sorra [m]	H argila [m]	q_c mig sorres [MPa]	q_c mig argiles [MPa]
1	0,00	1,00	0,00000	0,00666
2	0,00	1,00	0,00000	0,01107
3	0,00	1,00	0,00000	0,00681
4	0,04	0,96	1,89750	0,03282
5	0,02	0,98	3,31500	2,96847
6	0,30	0,70	7,30500	1,10786
7	1,00	0,00	13,38470	0,00000
8	1,00	0,00	13,50110	0,00000
9	1,00	0,00	11,09900	0,00000
10	1,00	0,00	9,97260	0,00000
11	0,85	0,15	9,86106	9,34067
12	0,81	0,19	8,88988	8,90790
13	0,89	0,11	8,67101	5,92000
14	1,00	0,00	11,36080	0,00000
15	1,00	0,00	6,89140	0,00000
16	0,32	0,68	9,17344	5,28294
17	0,21	0,79	9,86810	9,29076
18	0,09	0,91	12,71000	8,66121
19	0,04	0,96	9,95000	4,90813
20	0,00	1,00	0,00000	3,63480
21	0,00	1,00	0,00000	2,07530
22	0,00	1,00	0,00000	3,45430
23	0,00	1,00	0,00000	2,40690
24	0,06	0,94	11,76000	6,41011
25	0,16	0,84	9,76000	7,17869
26	0,00	1,00	0,00000	8,87290
27	0,01	0,99	10,64000	2,96101
28	0,00	1,00	0,00000	9,22830
29	0,00	1,00	0,00000	11,37690
30	0,07	0,93	8,52000	8,62065
31	0,00	1,00	0,00000	4,08690
32	0,06	0,94	12,25333	10,20479
33	0,03	0,97	4,58000	5,17175
34	0,00	1,00	0,00000	1,55610
35	0,00	1,00	0,00000	1,82330
36	0,00	1,00	0,00000	2,66460
37	0,00	1,00	0,00000	1,60400
38	0,02	0,98	2,20000	1,57469
39	0,05	0,95	7,25800	2,39695
40	0,00	1,00	0,00000	1,58820
41	0,00	1,00	0,00000	1,97080
42	0,00	0,04	0,00000	1,33250

Gruix total sorra:	10,03	m
Gruix total argila:	31,01	m

4.5 Obtenció de les dades de deformació del terreny

4.5.1 Descripció del extensòmetre lliscant.

L'extensòmetre lliscant consisteix en una sonda amb un mesurador de deformacions d'alta precisió que s'utilitza per a determinar la completa distribució de tensions i desplaçaments axials sobre d'un tub o revestiment de mesura instal·lat en roca, sòl o formigó.

Aquest tub de mesura, consisteix en una sèrie de marques metàl·liques connectades a un revestiment de protecció de PVC, està fixat fermament a les parets d'un sondeig d'uns 100 mm de diàmetre. La fixació es realitza amb abeurada de ciment o algun altre producte, tipus resina o polímers.

4.5.2 Procés de mesura.

La sonda s'introdueix al revestiment i es desplaça de manera successiva entre les marques de mesura, que estan col·locades en intervals d'un metre. Les dues terminacions de forma con - esfèrica de la sonda i les marques tenen unes guies que permeten el desplaçament de la sonda entre una marca i la següent (posició de desplaçament). Girant la sonda 45° i estirant del cable o barnilla de guia, els dos extrems de la sonda queden bloquejats entre dues marques consecutives (posició de mesura).

Un transductor de desplaçament lineal (LVDT) col·locat dintre de l'extrem de mesura s'activa i la mesura realitzada es transmet pel cable a la unitat de lectura digital.

La figura 4-28 resumeix la geometria de la sonda, el revestiment i les posicions tant de mesura com de desplaçament.

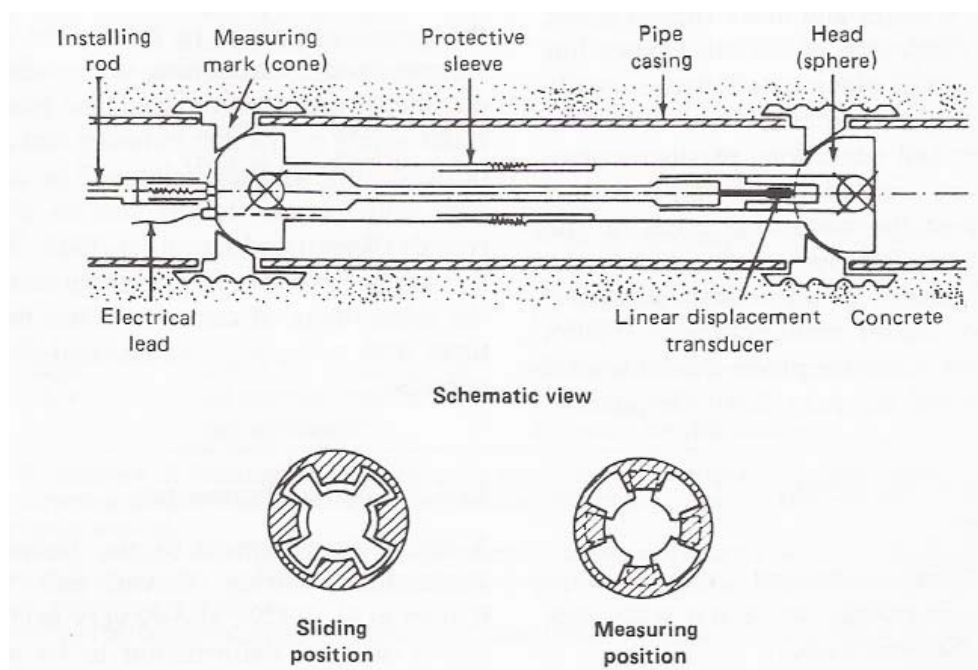


Figura 4-28. Esquema del extensòmetre lliscant. Components i posicions de lectura (Dunnicliff, 1988).

4.5.3 Profunditats de mesura.

Si el tub de mesura està vertical o fortament inclinat, la sonda es desplaça fins a la posició de mesura amb l'ajuda de barnilles de guia fins a fondàries de 30 metres. Per a profunditats superiors, es necessari l'ús de cable i un torn per a desplaçar la sonda.

Si es fan servir revestiment de mesura horitzontals o inclinats molt suaument, es possible mesurar longituds superior als 100 metres sense necessitat d'un torn.

4.5.4 Resultats de la mesura.

Amb un extensòmetre lliscant la realització de mesures és molt ràpida. Un revestiment de mesura de 30 metres de longitud es pot mesurar, en totes dues direccions, en trenta minuts.

4.5.5 Exactitud

Les mesures d'alta precisió s'aconsegueixen gràcies a l'alta reproductibilitat de col·locació de la sonda. Això es deu a l'extrem con - esfèric de la sonda que defineix la posició exacta del sensor respecta de la marca de mesura. La sensitivitat de l'instrument, en termes de deformació és de $1 \cdot 10^{-6}$, i el rang de mesura és de 10 mm (40 mm en situacions especials).

Els extensòmetres lliscants que es van utilitzar a la zona test i a la resta de la EDAR tenien una precisió de 0.03 mm per metre lineal.

4.5.6 Anàlisi de les dades del extensòmetres.

Per realitzar un control dels assentaments produïts al terreny per la precàrrega es van instal·lar tot un seguit de punts de mesura amb extensòmetre lliscant i durant un període llarg de temps es van realitzar controls sistemàtics. Cal tenir present que la separació temporal entre mesures no és constant ni el període de mesures és el mateix per tots els punts de control.

A la Taula 4-31 es presenta la relació entre els extensòmetres i els assaigs de penetració realitzats.

Taula 4-31. Relació dels extensòmetres utilitzats, profunditat assolida i assaigs amb el qual es relacionen.

Extensòmetre	Profunditat [m]	Lectures disponibles	Assaig de penetració
M04	61	27	CPT-3 i CPTu-2
M03	59	27	CPTu-4
1D01	64	19	CPTu-36
2Dx3	38	17	CPTu-19
3D03	61	14	CPTu-18

A la figura 4-29 es veu un exemple del resultats que s'obtenen amb un extensòmetre lliscant, concretament són els resultats del extensòmetre M04, molt proper als CPTu-2 i al CPT-3.

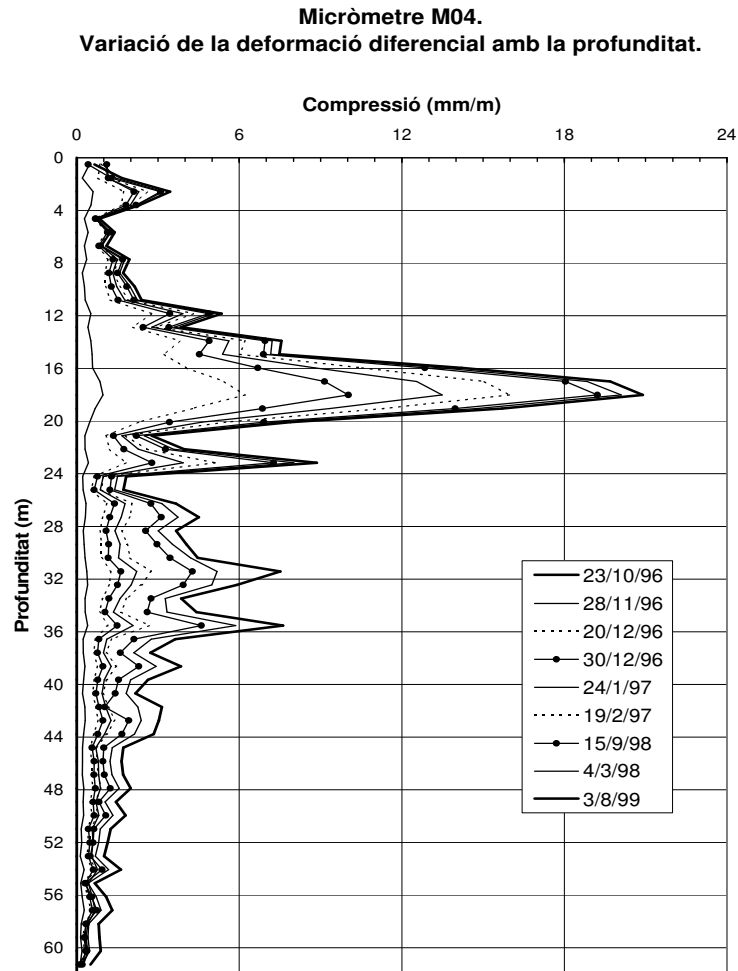


Figura 4-29. Resultats del extensòmetre lliscant M04 de la zona test de la precàrrega (Eurogeotècnia, 1999)

De la representació gràfica d'aquesta informació, se n'extreuen les següents conclusions:

- La màxima deformació està concentrada en el tram comprès entre els 6 i els 25 metres de profunditat, aproximadament.
- Per sota d'aquesta profunditat, la deformació va disminuint de manera progressiva fins a arribar a ser pràcticament nul·la al contacte amb el nivell detrític inferior. Tot i així, en aquest tram es presenten algunes valls de deformació importants, que corresponen a intercalacions de material granular.
- Els materials més superficials també presenten un nivell de deformació important.

Per que fa a evolució temporal:

- Els materials granulars presenten una deformació molt forta i ràpida, indicant que els assentaments estan dominats per la consolidació primària.
- Els materials cohesius presenten un comportament diferent, la deformació no és ràpida, es va incrementant amb el temps i no mostra signes d'estabilització en el moment de finalitzar el control.

Antecedents, recopilació i estudi de les dades per a la caracterització del terreny.

Cal observar el diferent comportament dels materials que formen el nivell cohesiu. A sostre presenten una deformació molt més important que a la base. Això s'explica pel diferent grau de consolidació que tenen: els materials del sostre estan normalment consolidats, degut a la influència de l'aqüífer superior) mentre el de la bases estan sobreconsolidats, com conseqüència de la important reducció de nivells d'aigua que es va produir a l'aqüífer inferior.

La darrera lectura representada (agost de 1999) correspon a la finalització de l'assaig de precàrrega de la zona test i està feta després del esglaó de descàrrega. S'observa com la deformació que es produeix entre aquesta mesura i l'anterior (març de 1998, encara amb tota la càrrega) en el material granulars és molt inferior a la que és produeix als materials cohesius, en els que apareixen alguns pics importants fins a 40 metres de fondària.

5 Estudi conjunt dels assaigs de penetració estàtica i de les deformacions del terreny.

En el capítol anterior d'aquest treball s'ha realitzat una interpretació directa de les dades obtingudes dels assaigs de penetració estàtica realitzats a la zona test.

Tal i com s'indica al final del capítol anterior, els resultats obtinguts no resulten prou satisfactoris de manera que s'ha desenvolupat un criteri propi de classificació del sòl.

A banda d'això, tant a la zona test de la precàrrega com a la resta de l'extensió de l'EDAR es va porta a terme un seguiment de les deformacions verticals (assentaments) produïdes per la sobrecàrrega. Aquest control es va realitzar amb un extensòmetre lliscant i amb la col·locació de punts de mesura a la superfície de l'EDAR.

En arribar a aquest punt disposem d'uns assaigs que ens permeten caracteritzar el terreny (assaig de penetració estàtica) i d'un control dels assentaments que es produeixen durant el procés de sobrecàrrega. Sembla clar que el següent pas és intentar relacionar la deformació produïda al terreny amb el model considerat a través dels paràmetres resistents característics del mateix. Per a fer-ho es realitza un ajust per mínims quadrats a partir de les dades de deformació reals mesurades i les deformacions calculades per al nostre model amb l'ajut d'un programa realitzat amb FORTRAN.

El procediment per a realitzar aquest ajust dels paràmetres és el següent:

- Es genera un model de terreny, amb el criteris propis definits, que classifiqui els materials que hi ha, se'ls hi assignen uns paràmetres per a definir el seu comportament i es calcula la deformació que es produeix a cada metre durant la precàrrega i al llarg de les diferents fases de temps.
- Es calculen els paràmetres del nostre model fins a aconseguir un ajust prou correcte entre les mesures de la deformació produïda en les diferents fases de temps i les deformacions calculades.

5.1 Metodologia de càlcul

En els apartats que segueixen es descriuen les diferents consideracions fetes amb el programa d'ajusts de paràmetres que s'ha desenvolupat.

5.1.1 Mètode dels mínims quadrats

El mètode del mínims quadrats ens permet trobar el millor ajust lineal possible entre una sèrie de dades reals i els paràmetres de la funció que relaciona ambdues variables.

La formulació matemàtica està extreta de Acha Daza i Daza Izquierdo (2001) és la següent: disposem d'una sèrie de n dades reals (observacions) que escrivim de manera vectorial com $\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$, on y_i representa una observació per a $i = 1, 2, \dots, n$.

Aquestes dades depenen d'una sèrie de n paràmetres que representem vectorialment com $\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$.

Suposem que hi ha una relació lineal entre els paràmetres i les dades i , el que volem, es trobar la funció que les relaciona.

Aquesta relació entre dades i paràmetres és una recta amb la següent expressió:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + \varepsilon \quad (5.1)$$

On a_0 és l'ordenada a l'origen de la recta, a_i són els coeficients dels diferents paràmetres i ε és l'error que hi ha entre l'aproximació calculada i la dada real.

Si la relació és no lineal, primer cal fer-la lineal de la següent manera:

$$a_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}; \forall i = 1 \div n \quad (5.2)$$

Per tal de millorar l'ajust el que fem és minimitzar l'error comès, és a dir minimitzar la següent expressió:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_i \cdot x_i) \quad (5.3)$$

Aquesta expressió però, genera errors importants quan apareix una gran discrepància en un punt. Aleshores el que fem és minimitzar la suma dels quadrats dels errors entre la dada real i la calculada. D'aquesta manera:

$$S_r = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_i \cdot x_i)^2 \quad (5.4)$$

Per a determinar els valors dels paràmetres hem de derivar l'expressió de l'error total respecte de tots els paràmetres i igualar a zero, és a dir:

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_i \cdot x_i) = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_i} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_i \cdot x_i) \cdot x_i = 0 \quad (5.6)$$

Estudi conjunt dels assaigs de penetració estàtica i de les deformacions del terreny

Ho podem escriure de forma matricial, agrupant totes les derivades parcials, de manera que obtenim:

$$\left[(y_1 - a_1 x_1 - a_0)(y_2 - a_1 x_2 - a_0) \dots (y_n - a_1 x_n - a_0) \right] \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} = [0 \quad 0] \quad (5.7)$$

Trasposem aquesta matriu:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 - a_1 x_1 - a_0 \\ y_2 - a_1 x_2 - a_0 \\ \dots \\ y_n - a_1 x_n - a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

La reescrivim de la següent manera:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Anomenem matriu A a la matriu que conté la informació de la variable dependent, és a dir, els paràmetres x_i i ens queda:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Aleshores ens queda el següent:

$$A^t \cdot (\bar{y} - A \cdot \bar{a}) = 0 \quad (5.11)$$

$$A^t \cdot \bar{y} - A^t \cdot A \cdot \bar{a} = 0 \quad (5.12)$$

On \bar{y} és el vector de les mesures i \bar{a} és el vector que conté els paràmetres del nostre model.

La solució al nostre problema és la següent:

$$\bar{a} = (A^t \cdot A)^{-1} \cdot A^t \cdot \bar{y} \quad (5.13)$$

Cal tenir present que les dimensions de la matriu A depenen de la quantitat d'observacions realitzades per una banda i, per altra banda, de la quantitat de paràmetres a determinar.

En aquesta explicació s'ha considerat que hi ha n observacions i dos paràmetres.

5.1.2 Paràmetres del terreny i equacions de deformació

A partir del procediment i dels criteris definits al capítol 2 es realitza una classificació del terreny en trams d'un metre de longitud.

La intenció és calcular l'assentament (deformació) que es produeix a cada tram d'una metre dels caracteritzats a partir dels assaigs de penetració estàtica i de les dades de deformacions que es van realitzar al llarg del temps. L'assentament total en un punt correspon a la suma de les deformacions a cada tram definit.

Per fer-ho ens cal un model del terreny. El model que es considera diferencia primerament entre materials granulars i materials cohesius. D'aquesta manera, el què fem es classificar la deformació en un tram segons els materials que hi ha, és a dir:

$$\delta_i^t = \delta d_i^t + \delta n d_i^t \quad (5.14)$$

On,

δ_i^t Deformació total al tram i-èssim a l'instant de temps t.

δd_i^t Deformació deguda als materials drenats al tram i-èssim per a l'instant t.

$\delta n d_i^t$ Deformació deguda als materials no drenants al tram i-èssim per a l'instant de t.

A partir de les dades que es tenen i dels resultats que s'han obtingut amb anterioritat, es diferencien més materials dintre de les categories ja definides, de manera que considerem que hi ha un únic material no drenant, les argiles de l'aquíard, i tres materials drenants: els llims superiors i els reblliments, i dos tipus de sorres dintre de l'aquífer superior.

El motiu pel qual es fa aquesta diferenciació dintre els materials no drenants és el següent: durant els reconeixements previs a la precàrrega, es van realitzar una sèrie d'assaigs sísmics ('cross-hole') per a determinar el mòdul d'elasticitat del materials. Els resultats d'aquests assaigs van indicar que les sorres del nivell detrític superior tenen una rigidesa variable amb la profunditat, de manera que es pot considerar que hi ha dos tipus de sorres, amb diferents propietats elàstiques. A més a més, la interpretació realitzada al capítol anterior mostra que els materials més superficials (llims i reblliments varis) tenen unes característiques molt diferenciades de la resta de materials drenants.

Per tal de calcular les deformacions que es produeixen degut a cada tipus de material ens cal definir un comportament mecànic a cadascun. D'acord amb els criteris habituals utilitzats a geotècnia, es considera que els materials drenants tenen un comportament elàstic mentre que els no drenants tenen un comportament elastoplàstic.

D'aquesta manera els materials no drenants – elastoplàstics queden caracteritzats pels índex de compressibilitat (C_c), d'inflament (C_s), el coeficient de consolidació primària vertical (c_v) i el coeficient de consolidació secundària (c_{α}^{Argila}).

Degut al comportament d'aquests materials es necessari un paràmetre que determini si el comportament és elàstic o elastoplàstic. Aquest paràmetre és la pressió de preconsolidació, $p'_{c'}$, de manera que la seva relació amb la tensió efectiva vertical total és la que defineix el règim mecànic de comportament dels materials no drenants.

Cadascun dels tres materials drenants – elàstics definits queden caracteritzats per un mòdul d'elasticitat i un coeficient de consolidació secundària, tal i com es veu a la Taula 5-1.

Taula 5-1. Paràmetres dels materials drenants – elàstics.

Material	Paràmetre	Símbol
Llims	Mòdul elàstic	E_{lim}
	Coefficient de consolidació secundària	c_{α}^{lim}
Sorres_1	Mòdul elàstic	E_{S1}
	Coefficient de consolidació secundària	c_{α}^{S1}
Sorres_2	Mòdul elàstic	E_{S2}
	Coefficient de consolidació secundària	c_{α}^{S2}

En resum, inicialment considerem 10 paràmetres del terreny, que són els que es veuen a la Taula 5-2.

Taula 5-2. Llistat dels paràmetres inicials que intervenen al model de terreny considerat.

	Llims		Sorres_1		Sorres_2		Argiles			
Paràmetre	E_{lim}	c_{α}^{lim}	E_{S1}	c_{α}^{S1}	E_{S2}	c_{α}^{S2}	C_c	C_s	C_v	C_{α}^{Argila}

Amb tot això, el model està definit per dues equacions en funció del comportament en regim elàstic o elastoplàstic dels materials. El que determina el comportament és la relació de la tensió efectiva final, σ'_f , (amb la sobrecàrrega aplicada) amb la pressió de preconsolidació, p'_c , tal i com s'indica a les següents equacions:

- Regim elastoplàstic, ($p'_c < \sigma'_f$) i $t > t_{90}$:

$$\delta_i = \frac{\Delta\sigma}{E_{lim}} \cdot h_{lim}(i) + \frac{\Delta\sigma}{E_{S1}} \cdot h_{S1}(i) + \frac{\Delta\sigma}{E_{S2}} \cdot h_{S2}(i) + \frac{U(t) \cdot h_{arg}(i)}{2 \cdot (1 + e_0)} \left[c_c \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_f}{p'_c}\right) + c_s \cdot \ln\left(\frac{p'_c}{\sigma'_0}\right) \right] + c_{\alpha}^{lim} \cdot h_{lim}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{\alpha}^{S1} \cdot h_{S1}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{\alpha}^{S2} \cdot h_{S2}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{\alpha}^{arg} \cdot h_{arg}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) \quad (5.15)$$

- Regim elàstic, ($p'_c \geq \sigma'_f$) i $t > t_{90}$:

$$\delta_i = \frac{\Delta\sigma}{E_{lim}} \cdot h_{lim}(i) + \frac{\Delta\sigma}{E_{S1}} \cdot h_{S1}(i) + \frac{\Delta\sigma}{E_{S2}} \cdot h_{S2}(i) + \frac{U(t) \cdot h_{arg}(i)}{2 \cdot (1 + e_0)} \left[c_s \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_0}\right) \right] + c_{\alpha}^{lim} \cdot h_{lim}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{\alpha}^{S1} \cdot h_{S1}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{\alpha}^{S2} \cdot h_{S2}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{\alpha}^{arg} \cdot h_{arg}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) \quad (5.16)$$

Aquestes són les expressions més generals que podem escriure, amb la intervenció de tots els paràmetres definits, fins i tot el de consolidació secundària (d'aquí que s'indiqui la condició de $t > t_{90}$).

On,

$h_{lim}(i)$	Gruix de llims existents en el tram i-èssim.
$h_{S1}(i)$	Gruix de Sorres_1 existents en el tram i-èssim.
$h_{S2}(i)$	Gruix de Sorres_2 existents en el tram i-èssim.
$h_{arg}(i)$	Gruix d'argiles existents en el tram i-èssim
E_{lim}	Mòdul elàstic dels llims
E_{S1}	Mòdul elàstic de les sorres superiors (Sorres_1)
E_{S2}	Mòdul elàstic de les sorres inferiors (Sorres_2)
$\Delta\sigma$	Sobrecàrrega al terreny
e_0	Índex de porus dels materials argilosos (no drenants)
$U(t)$	Grau de consolidació dels materials argilosos
C_s	Índex d'inflament dels materials argilosos
C_c	Índex de compressibilitat dels materials argilosos
p'_c	Pressió de preconsolidació
σ'_0	Tensió efectiva inicial (sense la sobrecàrrega)
σ'_f	Tensió efectiva final (amb la sobrecàrrega)
c_α^{lim}	Coefficient de consolidació secundària dels llims
c_α^{S1}	Coefficient de consolidació secundària de les sorres superiors (Sorres_1)
c_α^{S2}	Coefficient de consolidació secundària de les sorres inferiors (Sorres_2)
c_α^{Argila}	Coefficient de consolidació secundària de les argiles
t_{90}	Temps d'inici de la consolidació secundària (quan s'ha produït un 90% de la consolidació total)
t	Temps en què calculem la deformació.

Aquestes són les equacions més generals que modelen el terreny que estudiem. Ara bé, es poden fer algunes variacions per tal que siguin més compatibles amb les dades de camp i els resultats dels assaigs que s'han realitzat. Aquestes variacions són les que s'exposen tot seguit:

- El mòdul elàstic dels llims i de les sorres es pot calcular amb una expressió que el relaciona amb la resistència en punta, q_c , que s'obté dels assaigs de penetració estàtica a través d'un paràmetre. L'expressió és la següent (Bellotti et al., 1989):

$$E = \alpha \cdot q_c \quad (5.17)$$

On α és un paràmetre adimensional que depèn de la litologia i de les condicions tensionals del terreny. És una correlació molt similar a la utilitzada a l'apartat 4.3.3.5.

D'aquesta manera, a les equacions del model hi intervenen tres paràmetres α , un per els llims superficials (α_{lim}) i dos per les sorres (α_{S1} i α_{S2}) que substituiran els tres mòduls elàstics abans utilitzats.

- S'ha observat a partir d'assaigs de laboratori, que el coeficient de consolidació secundària de les argiles està relacionat amb l'OCR, tal i com es pot veure a la figura 5-1. La equació que relaciona ambdós paràmetres és la següent:

$$C_\alpha^{arg} = a \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \exp(b \cdot (1 - OCR))) \quad (5.18)$$

On a i b són dos paràmetres adimensionals.

Observi's que si el terreny està normalment consolidat (OCR=1), l'únic paràmetre que hi intervé és el paràmetre a. Per a que actuï el paràmetre b cal que el terreny estigui sobreconsolidat (OCR>1).

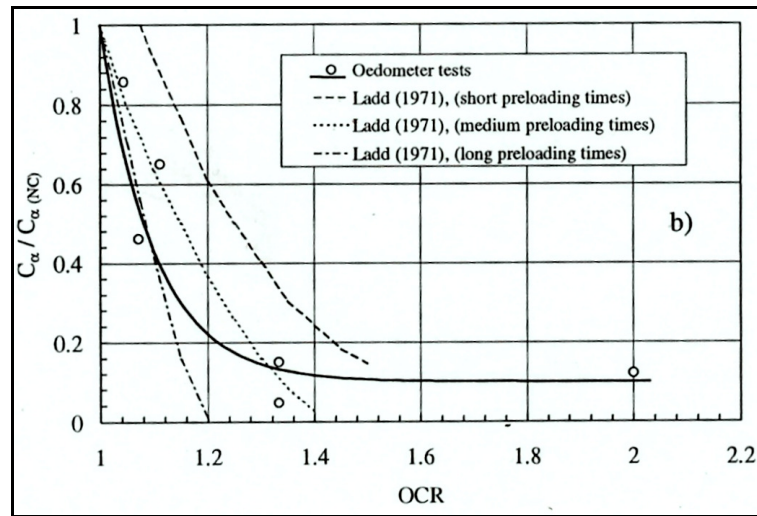


Figura 5-1. Correlació entre l'OCR i el coeficient de consolidació secundària c_α realitzada a partir d'assaigs edomètrics (Alonso,E.E. et al, 1999).

Amb totes aquestes consideracions total de paràmetres que cal ajustar passa de 10 a 11. A la Taula 5-3 hi ha els paràmetres considerats per a cada material.

Taula 5-3. Llistat de la totalitat de paràmetres que intervenen al model de terreny considerat.

	Llims		Sorres_1		Sorres_2		Argiles				
Paràmetre	α_{lim}	c_{α}^{lim}	α_{S1}	c_{α}^{S1}	α_{S2}	c_{α}^{S2}	C_c	C_s	c_v	a	b

Amb aquests paràmetres i preparant l'equació per a l'ajust per mínims quadrats (linealització dels paràmetres a ajustar), ens queda:

- Regim elastoplàstic, ($p'_c < \sigma'_f$) i $t > t_{90}$:

$$\begin{aligned}
 \delta_i = & \frac{\Delta\sigma}{q_c^{lim}} \cdot \alpha_{lim}^{-1} \cdot h_{lim}(i) + \frac{\Delta\sigma}{q_c^{S1}} \cdot \alpha_{S1}^{-1} \cdot h_{S1}(i) + \frac{\Delta\sigma}{q_c^{S2}} \cdot \alpha_{S2}^{-1} \cdot h_{S2}(i) + \frac{U(t) \cdot h_{arg}(i)}{2 \cdot (1 + e_0)} \left[c_c \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_f}{P'_c}\right) + c_s \cdot \ln\left(\frac{P'_c}{\sigma'_0}\right) \right] + \\
 & + c_{lim}^{\alpha} \cdot h_{lim}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{S1}^{\alpha} \cdot h_{S1}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + c_{S2}^{\alpha} \cdot h_{S2}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) + \\
 & + (a \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \exp(b \cdot (1 - OCR)))) \cdot h_{arg}(i) \cdot \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right)
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

- Regim elàstic, ($p_c' \geq \sigma_r'$) i $t > t_{90}$:

$$\begin{aligned} \delta_i = & \frac{\Delta\sigma}{q_c^{l_{lim}}} \cdot \alpha_{l_{lim}}^{-1} \cdot h_{l_{lim}}(i) + \frac{\Delta\sigma}{q_c^{s1}} \cdot \alpha_{s1}^{-1} \cdot h_{s1}(i) + \frac{\Delta\sigma}{q_c^{s2}} \cdot \alpha_{s2}^{-1} \cdot h_{s2}(i) + \frac{U(t) \cdot h_{arg}(i)}{2 \cdot (1 + e_0)} \left[c_s \cdot \ln \left(\frac{\sigma_f'}{\sigma_0'} \right) \right] + \\ & c_{l_{lim}}^\alpha \cdot h_{l_{lim}}(i) \cdot \log \left(\frac{t}{t_{90}} \right) + c_{s1}^\alpha \cdot h_{s1}(i) \cdot \log \left(\frac{t}{t_{90}} \right) + c_{s2}^\alpha \cdot h_{s2}(i) \cdot \log \left(\frac{t}{t_{90}} \right) + \\ & + (a \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \exp(b \cdot (1 - OCR)))) \cdot h_{arg}(i) \cdot \log \left(\frac{t}{t_{90}} \right) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Com ja s'ha dit en escriure les equacions (5.15) i (5.16), aquestes són les expressions més generals que podem escriure. Per això cal indicar la condició de $t > t_{90}$.

Aquestes són les equacions que el programa fa servir per a calcular els assentament del terreny. Amb aquest model de deformació, els paràmetres que cal ajustar són els següents: $1/\alpha_{l_{lim}}$, $1/\alpha_{s1}$, $1/\alpha_{s2}$, C_c , C_s , a , b , $C_\alpha^{l_{lim}}$, C_α^{s1} , C_α^{s2} i C_v , que està dintre del terme $U(t)$.

El gruix de l'estrat és una factor molt important per a determinar l'assentament per consolidació primària i els resultats són molt diferents en funció de la potència considerada. En la teoria clàssica de la consolidació, el gruix del estrat que consolida és un dels paràmetres més importants. El programa calcula el grau de consolidació de l'estrat segons l'equació:

$$U(T) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp \left(\frac{-\pi^2 (2n+1)^2 T}{4} \right) \quad (5.21)$$

On T és el paràmetre temps adimensionalitzat de la resolució de l'equació de la consolidació i val:

$$T = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (5.22)$$

Com ja s'ha dit anteriorment, el programa calcula els assentaments en trams de metre i els compara amb els assentaments reals obtinguts en el extensòmetres propers. Això no és vàlid per als material cohesius ja que no tenim estrats de metre sinó que hi ha paquets de potencia superior.

Com es desprèn de l'estudi de la classificació del material feta per als assaigs disponibles, la composició del terreny és molt uniforme per sota del paquet de sorres superior i són, bàsicament, argiles i llims. Dintre d'aquests materials es troben diferents passades de materials sorrencs els gruixos dels quals varien de centimètrics a mètrics segons l'assaig. Per aplicar de forma més correcta la teoria de la consolidació es considera, incialment, que les passades de sorres amb un gruix inferior a 10 centímetres dintre d'aquests materials no cohesius no intervenen. Igualment, es fa una reagrupació dels gruixos dels materials cohesius de manera que 5 trams consecutius d'argiles, a l'hora d'aplicar la teoria de la consolidació es consideren un únic estrat de gruix 5 metres.

5.1.3 Distribució de les sobrecàrreges al terreny.

Un dels principals problemes de les precàrregues està en saber com es distribueixen les tensions addicionals en el terreny. En general, es considera que quan la llargada de la zona precarregada és molt més gran que la potencia del terreny que es vol millorar, la distribució de les tensions addicionals es distribueixen de manera uniforme en el sòl. És a dir, en un punt a una profunditat fixada, la tensió vertical total que hi actua és el pes de la columna de terreny que té per sobre més la totalitat de la tensió addicional proporcionada per la sobrecàrrega.

Això és el que passa quan es considera la totalitat de la zona de precàrrega, perquè afecta a uns 60 metres de gruix mentre que té una longitud de més d'un quilòmetre.

Ara bé, en el cas de l'estudi de la zona test això no és verificat ja que la zona test era un quadrat de 80 metres de costat, una mida molt similar a la profunditat que afecta la precàrrega. En aquest cas, la distribució de la sobrecàrrega no és uniforme sinó que depèn de la profunditat del punt considerat així com de la seva posició en la planta de la zona carregada.

Utilitzant un programa de càlcul mitjançant elements finits i considerant un model elàstic del terreny, s'ha arribat a reconstruir com és aquesta distribució de sobrecàrregues en la zona test. El resultat es veu a la figura 5-2.

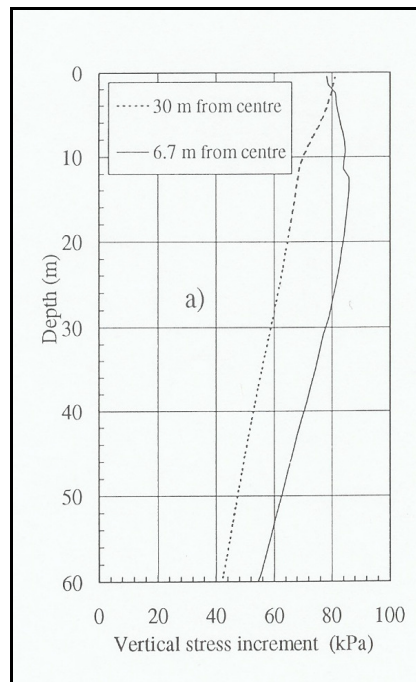


Figura 5-2. Distribució de les tensions verticals a la zona test extrems d'una anàlisi amb elements finits (Alonso, E.E. et al, 1999).

Al programa aquesta variabilitat en la distribució de les càrregues de la precàrrega està contemplada de la següent forma: el programa demana a l'usuari la posició de l'assaig a estudiar. Hi ha tres opcions: al centre de la zona test, a una banda de la zona test i fora de la zona test.

En aquesta última opció es considera la distribució de sobrecàrregues uniforme al llarg de tota la profunditat de l'assaig estudiat, degut als motius esmentats anteriorment. A priori es considera una sobrecàrrega equivalent a un terraplè de 4 metres d'altura.

En els altres dos casos es considera que la distribució de sobrecàrregues no és uniforme, com es veu a la figura 5-2.

Estudi conjunt dels assaigs de penetració estàtica i de les deformacions del terreny

Les distribucions de tensions considerades per a la zona test són les següents (totes les equacions expressades en MPa):

- Punt central de la zona test:

$$\text{Si } z \leq 12 \text{ m : } \Delta\sigma(z) = 0.08 + 0.0005 \cdot (z - 0.5) \quad (5.23)$$

$$\text{Si } 13 \leq z \leq 24 \text{ m : } \Delta\sigma(z) = 0.087 - 0.00045454 \cdot ((z - 0.5) - 13) \quad (5.24)$$

$$\text{Si } z > 24 \text{ m : } \Delta\sigma(z) = 0.081 - 0.000773585 \cdot ((z - 0.5) - 24) \quad (5.25)$$

- Punt extrem de la zona test:

$$\text{Si } z \leq 3 \text{ m : } \Delta\sigma(z) = 0.08 - 0.0003333 \cdot (z - 0.5) \quad (5.26)$$

$$\text{Si } 3 \leq z \leq 11 \text{ m : } \Delta\sigma(z) = 0.079 - 0.00128571428 \cdot ((z - 0.5) - 3) \quad (5.27)$$

$$\text{Si } z > 11 \text{ m : } \Delta\sigma(z) = 0.07 - 0.00051515 \cdot ((z - 0.5) - 11) \quad (5.28)$$

A la figura 5-3 es pot veure com queda aquesta distribució de càrregues en la zona test.

El principal efecte d'aquesta sobrepressió està en que modifica el valor de la pressió de preconsolidació i, per tant, altera el comportament de les argiles ja que modifica l'OCR i els trams de comportament elàstic o elastoplàstic.

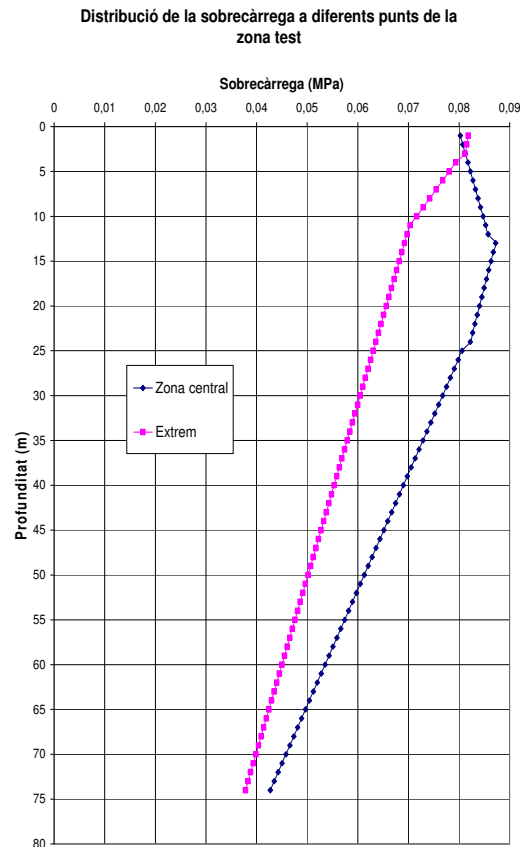


Figura 5-3. Distribució de l'increment de la tensió vertical total produït per efecte de la sobrecàrrega a diferents punts de la zona test.

Cal dir, que malgrat a la realitat la prova test consiederva una fase de descàrrega, la variació de la sobrecàrrega aplicada per aquest fet no s'ha considerat en aquest treball.

5.1.4 Condicions hidrogeològiques del terreny.

Tal i com ja s'ha dit al capítol 1, els terrenys sobre els quals està construïda la estació depuradora són terrenys deltaics i en ells, hi ha dos aqüífers. L'aqüífer inferior (les graves de la base) ha estat molt explotat al llarg del temps i això ha provocat importants variacions en la distribució de pressions d'aigua en el terreny i, amb ella, de les tensions efectives actants.

Com s'ha vist a través dels estudis realitzats, les condicions hidrostàtiques només es mantenen fins a una fondària d'entre 15 i 20 metres, que és on les sorres són més abundants, per la influència de l'aqüífer superior.

Per sota d'aquesta profunditat, no es coneix exactament la distribució de pressions d'aigua encara que es coneixen algunes dades que poden ajudar a determinar-la. Pels estudis realitzats l'any 1999, es va veure que a les argiles situades a 60 metres de profunditat (just sobre les graves de l'aqüífer inferior) la pressió d'aigua era inferior a la hidrostàtica, concretament 5 m.c.a. menys (0,05 MPa).

Però aquesta no és la pressió mínima mesurada ja que se sap que l'any 1973 aquesta diferència era molt més important, exactament de 25 m.c.a. (0,25 MPa) a la mateixa profunditat.

Aquesta sobreexplotació de l'aqüífer inferior ha tingut importants efectes en la deformabilitat del terreny, ja que la important variació de les tensions efectives que s'han produït al llarg del temps han provocat la sobreconsolidació de les argiles que estan immediatament per sobre d'aquest aqüífer. Per altra banda, aquesta sobreconsolidació no ha afectat a tot el paquet d'argiles ja que les argiles que estan just a sota de l'aqüífer superior no es veuen afectades per aquest fenomen degut, precisament, a la proximitat a aquest aqüífer.

A més a més d'aquesta sobreconsolidació, la variació de la pressió d'aigua ha fet variar la pressió efectiva del terreny. Amb les dades que coneixem, sabem que al 1973 la pressió d'aigua era mínima i, consegüentment, la tensió efectiva era màxima i és el valor de la pressió de preconsolidació del terreny. A partir d'aquest any hi ha una recuperació de la pressió d'aigua fins a les dades de l'any 1999, on la pressió d'aigua és superior, acostant-se a la pressió hidrostàtica, i per tant, la tensió efectiva és inferior. La figura 5-4 mostra aquest comportament de manera esquemàtica, ja que les dades reals tenen moltes oscil·lacions, en funció de les condicions meteorològiques o d'utilització dels recursos hídrics.

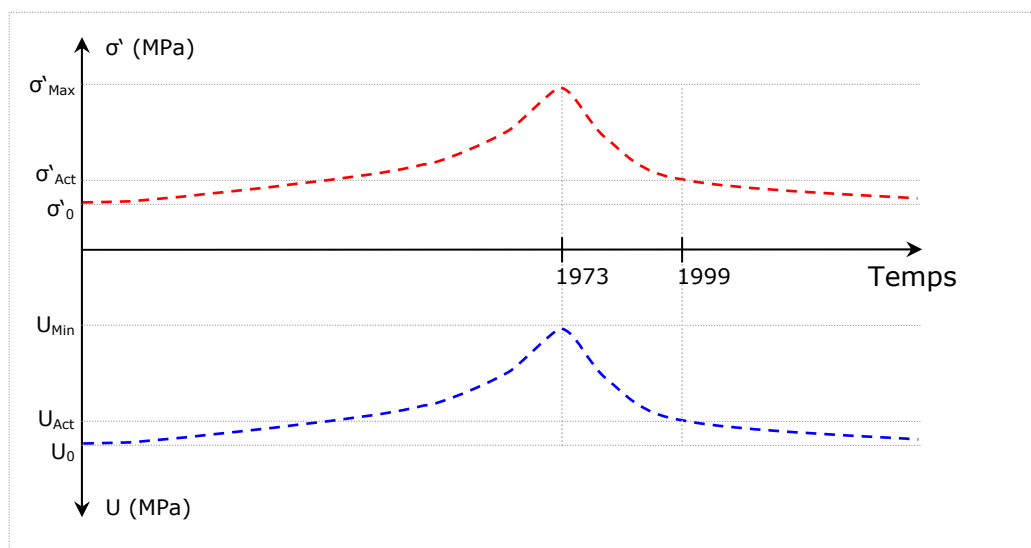


Figura 5-4. Esquema de l'evolució temporal de la pressió d'aigua i de la tensió efectiva al nivell argilós intermediari.

Estudi conjunt dels assaigs de penetració estàtica i de les deformacions del terreny

Totes aquestes variacions afecten el procés de càlcul del programa de la següent forma:

- Es fixa una profunditat de 18 metres fins a la qual la distribució de pressions d'aigua és la hidrostàtica (expressada en MPa).

$$\text{Si } z \leq 18 \text{ m : } P_w(z) = (z - 0.5) \cdot 0.01 \quad (5.29)$$

- Per sota d'aquesta profunditat, la distribució de pressions d'aigua és inferior a la hidrostàtica i segueix la següent equació (expressada en MPa):

$$\text{Si } z > 18 \text{ m : } P_w(z) = 0.18 + 0.00875 \cdot ((z - 0.5) - 18) \quad (5.30)$$

Aquesta és la distribució de pressions d'aigua que es fa servir per a calcular la distribució de tensions efectives i és la que dona la diferència de 5 m.c.a. entre la real i la hidrostàtica.

- La pressió de preconsolidació es correspon a la màxima tensió efectiva que ha actuat sobre el terreny. Amb les dades que tenim, aquesta situació és la que es va produir l'any 1973, quan la pressió d'aigua era mínima en el terreny. La distribució de pressió d'aigua en aquell moment correspon a la següent equació (expressada en MPa):

$$\text{Si } z \leq 18 \text{ m : } P_{w \text{ min}}(z) = P_w(z) \quad (5.31)$$

$$\text{Si } z > 18 \text{ m : } P_{w \text{ min}}(z) = 0.18 + 0.00375 \cdot ((z - 0.5) - 18) \quad (5.32)$$

- L'aplicació de la precàrrega provoca una variació de les tensions efectives i de la profunditat a partir de la qual hi ha sobreconsolidació. D'aquesta manera, la nova distribució de la pressió de preconsolidació un cop feta la precàrrega és la següent (expressada en MPa):

$$\text{Si } z \leq Z_{\text{nova}} \text{ m : } P'_c(z) = \sigma'_0 + \Delta\sigma \quad (5.33)$$

$$\text{Si } z > Z_{\text{nova}} \text{ m : } P'_c(z) = ((z - 0.5) \cdot 0.002) - P_{w \text{ min}}(z) \quad (5.34)$$

On Z_{nova} és la profunditat fins a la qual la tensió efectiva màxima no és la que correspon a la situació de mínima pressió d'aigua sinó que és la que correspon a la situació de precàrrega, σ'_0 és la tensió efectiva original i $\Delta\sigma$ és l'increment de les tensions produït per l'efecte de la sobrecàrrega.

Aquesta profunditat Z_{nova} és variable ja que depèn de la sobrecàrrega aplicada. Aquest és el mètode de càlcul que s'ha implementat al programa.

Totes aquestes distribucions de la pressió d'aigua estan representades a la figura 3-7.

El valor de P'_c calculat pel mètode esmentat és el que es fa servir per calcular el grau de sobreconsolidació del terreny (OCR), ja que correspon a la tensió efectiva màxima que ha actuat sobre el terreny considerant totes les situacions.

L'OCR es defineix com la relació entre la màxima tensió efectiva aplicada al terreny i la tensió efectiva actual. Donat que la màxima tensió efectiva es va produir quan la pressió d'aigua era mínima, la tensió efectiva màxima correspon a la pressió de preconsolidació i aquest és el valor que s'ha considerat per a calcular l'OCR i utilitzar-lo dintre del programa. L'evolució de l'OCR al llarg del temps és anàloga a la branca de la tensió efectiva de la figura 3-4

A l'igual que la pressió de preconsolidació, el valor de l'OCR està afectat per el valor de la sobrecàrrega ja que, degut a l'increment de les tensions efectives que provoquen les tensions addicionals, la profunditat a la qual s'inicia la sobreconsolidació del terreny s'incrementa. Aquest efecte s'ha considerat al programa de càlcul.

Aquest efecte es veu també a l'OCR i es veu a la figura 5-5.

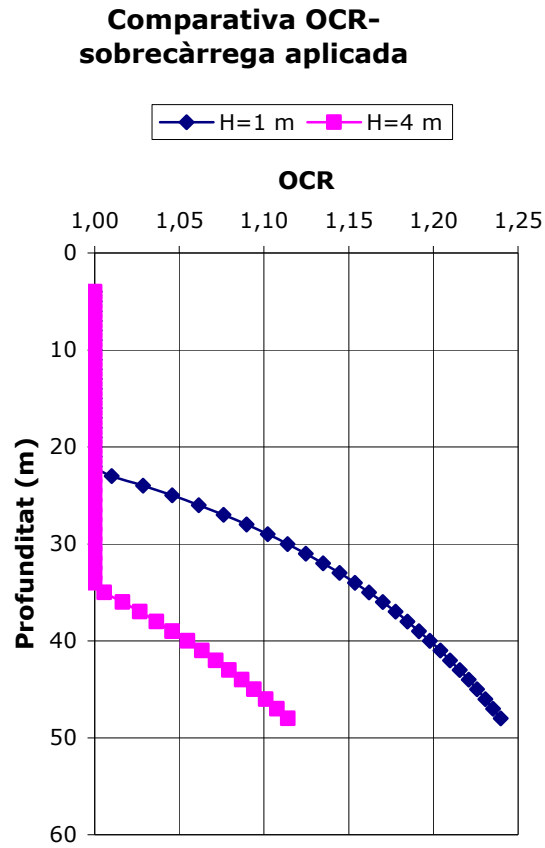


Figura 5-5. Variació de l'OCR amb la profundita segons la sobrecàrrega aplicada.

5.2 Funcionament del programa desenvolupat.

En els apartats anteriors s'han comentat breument la metodologia de càlcul emprada així com alguna de les hipòtesis que s'han fet. En aquest apartat es pretén explicar de manera breujada el funcionament del programa però fent èmfasi a les dades que necessita i d'on les obté.

El primer que fa el programa és demanar els fitxers dels quals obté les dades geomètriques i temporals bàsiques i algunes dades d'aquests arxius o d'altres que li permeten generar el model de terreny, tal i com s'indica a la Taula 5-4 i a la Taula 5-5.

Taula 5-4. Llistat dels arxius bàsics que demana el programa.

Arxius bàsics	Fitxer de dades del cpt/cptu Fitxer de dades del extensòmetre Fitxer de dades temps ⁽¹⁾
----------------------	--

Taula 5-5. Llistat de les dades que demana el programa.

Dades dels arxius	Nº de punts del cpt/cptu Nº de punts del extensòmetre ⁽²⁾ Nº de mesures temporals ⁽³⁾
Dades geomètriques	Profunditat de separació de les sorres ⁽⁴⁾ Profunditat dels llims ⁽⁴⁾ Profunditat de la punta cega ⁽⁵⁾
Dades temporals	Temps d'origen ⁽⁶⁾ Temps final de la càrrega ⁽⁶⁾
Altres paràmetres	Valors inicials de tots els paràmetres que s'han d'ajustar, onze en total Valor de e_0 ⁽⁷⁾ Valor de R_f ⁽⁸⁾

⁽¹⁾ Es demana l'arxiu que conté el temps transcorregut entre les diverses mesures realitzades al extensòmetre considerat. És una dada important perquè determina a partir de quin moment intervé la consolidació secundària a les equacions de deformació.

⁽²⁾ És a dir, la profunditat a la que arriba el extensòmetre. Molt sovint el extensòmetre és més curt que l'assaig de penetració al què està relacionat; és a dir, hi ha una sèrie de punts de l'assaig que no serveixen per fer l'ajust perquè no es disposa de dades de deformació a la profunditat a la que estan. Al demanar aquesta dada, s'eliminen els punts sobrants.

⁽³⁾ La quantitat de lectures que s'han realitzat en el extensòmetre considerat al llarg del temps.

⁽⁴⁾ Amb la introducció d'aquests dos paràmetres el que es pretén és fixar, d'alguna manera, la geometria del problema. La fondària dels llims indica que tots els materials no arenosos que es trobin per sobre d'ella són considerats, a efectes de classificació i càlcul, com a llims. La separació de les sorres indica a quina fondària hi ha el canvi de comportament de les sorres.

⁽⁵⁾ L'anàlisi de les dades obtingudes amb els assaigs de penetració mostra que, en alguns casos, els resultats de les zones més superficials no són fiables ni per a realitzar la classificació del material ni per a ajustar els paràmetres del terreny, ja que hi ha valors anòmals. Amb la introducció d'aquesta dada, els punts situats per sobre no es consideren en el càlcul.

(6) El temps final de la càrrega és el temps que triga en col·locar-se la totalitat del terraplè que s'utilitza per la precàrrega. És una dada jumptant per a determinar el temps d'inici dels càlculs perquè es considera que aquest temps no és ni el temps d'origen ni el temps final de la càrrega sinó que es calcula segons la següent fórmula:

$$t_{inicial\grave{c}alcul} = t_{origen} + \frac{2}{3}(t_{final} - t_{origen}) \quad (5.35)$$

On t_{origen} és el moment d'inici de la precàrrega, t_{final} és el moment en que finalitza la precàrrega i $t_{inicial\grave{c}alcul}$ és el moment que considerem per iniciar els càlculs. Tots aquests valors es determinen de les gràfiques de control que es realitzaven durant el procés de precàrrega, tal i com es veu a la figura 5-6.

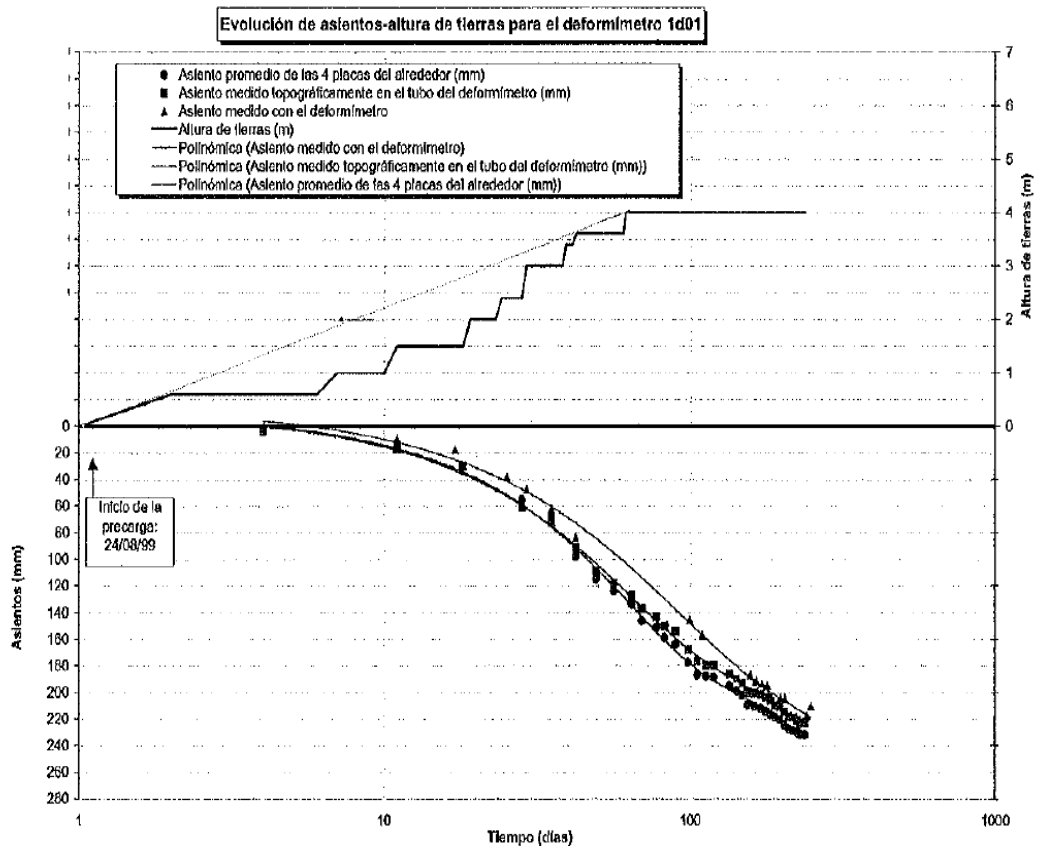


Figura 5-6. Determinació de les diferents fases de la precàrrega a partir del control realitzat durant el procés (Eurogeotècnia, 1999)

(7) L'índex de porus e_0 no és un dels paràmetres que s'ajusta amb el programa però és necessari perquè intervé en el càlcul de deformacions.

(8) R_f s'ha d'introduir per a realitzar la classificació de materials. Tal i com ja s'ha comentat es considera que té un valor constant de 1% però s'ha comprovat que en el cas del CPT-3 aquest valor no dóna bons resultats; en aquest cas val 1.8 %. Per aquest motiu és una dada a introduir i no una constant del programa.

A la figura 5-7 hi ha un esquema del funcionament del programa que s'ha fet servir per a aquest treball.

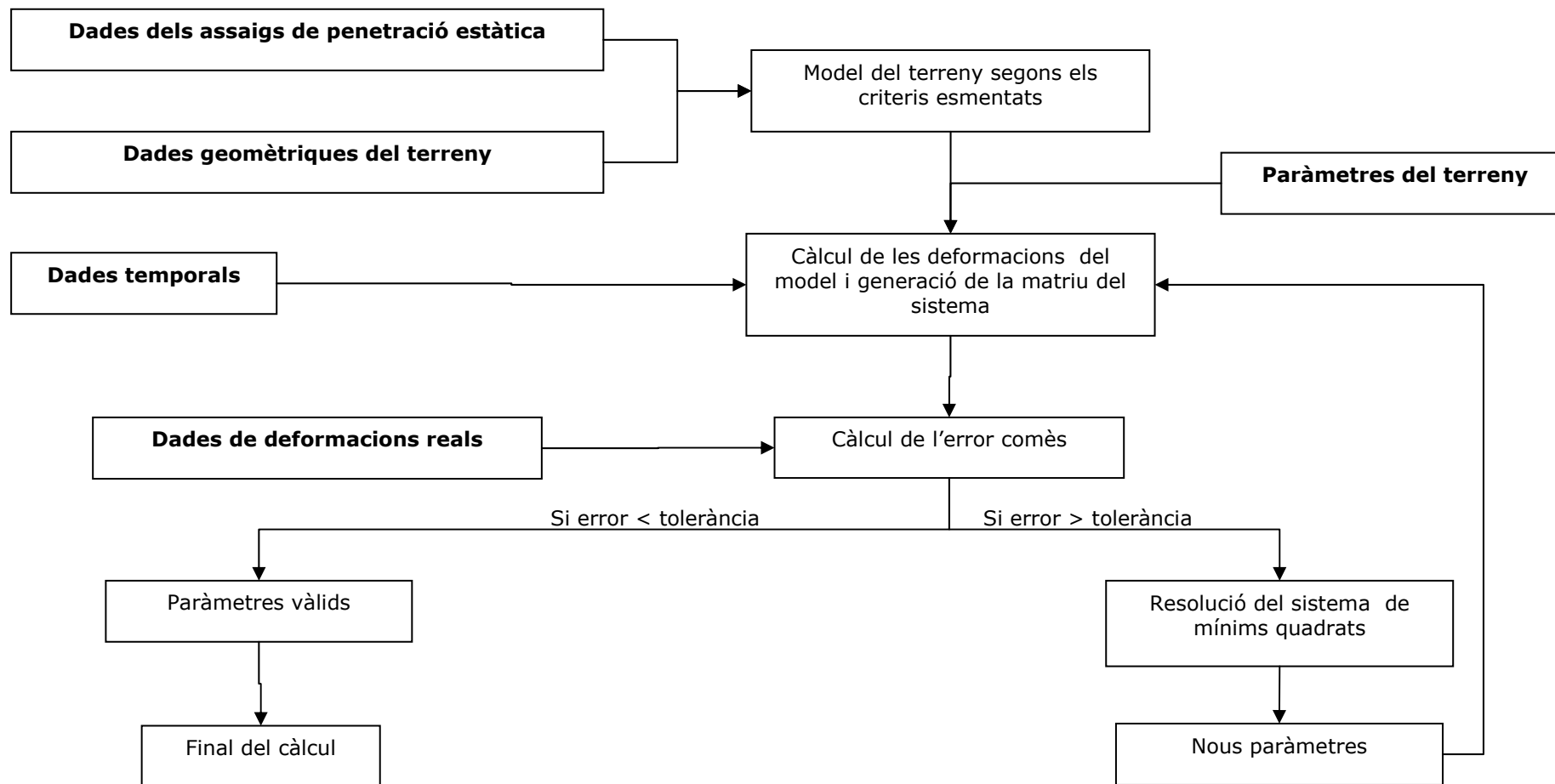


Figura 5-7 . Esquema del funcionament del programa desenvolupat per a l'ajust dels paràmetres del terreny. En negreta, les dades bàsiques necessàries per a la generació i resolució del sistema.

5.2.1 Consideracions importants.

A banda dels comentaris fets a l'apartat anterior hi ha tota una sèrie de consideracions que tenen importància a l'hora d'utilitzar el programa, que són les que es presenten tot seguit:

- A priori es considera que la consolidació primària s'acaba als 90 dies des de la col·locació de la totalitat de la sobrecàrrega. Ara bé, existeix la possibilitat que la consolidació secundària comenci abans d'aquest temps i es una dada que s'analitza en els resultats.
- L'ajust no es fa directament a les dades mesurades dels extensòmetres sinó que es fa a un valor mig calculat a partir de tres mesures: la del tram que volem calcular i les dels tram anterior i posterior. Degut a això, el primer i el darrer tram no es fan servir a l'ajust perquè no es pot calcular el valor al què ajustar.

Amb aquest filtre s'aconsegueix una distribució de deformacions mesurades en profunditat més uniforme i suau, ja que els pics de deformació queden distribuïts en un interval de fondària i no en un únic punt. Tot i això, no oblidem que l'aplicació d'un filtre provoca una certa pèrdua d'informació. L'aplicació d'aquest filtre transforma les dades de deformacions de la manera que es veu a la figura 5-8.

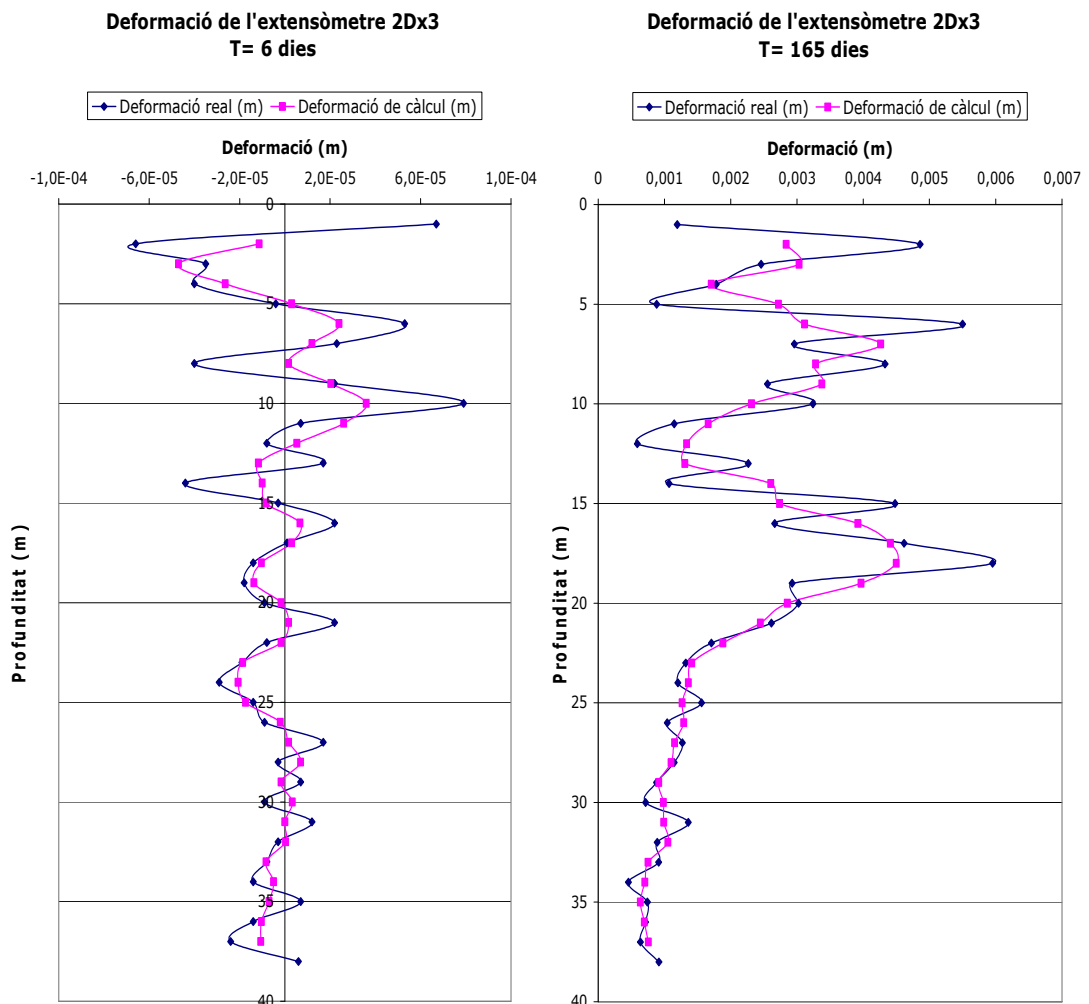


Figura 5-8. Comparació entre les dades reals de deformació i les deformacions filtrades que utilitzem per a fer l'ajust. Correspon al micròmetre 2Dx3, proper al CPTu 19.

- El programa fa un màxim de 10 iteracions per a calcular els valors ajustats.
- Es fixa una tolerància inicial que és el principal criteri que té el programa per a deturar o continuar el càlcul. El valor inicial és de 0.0015 m / m, metres d'error per metre lineal avançat.
- Es calcula el grau de consolidació ($U(t)$) dels estrats d'argiles considerant-los agrupats, és a dir, els que es troben entre granulars de gruix superior a 0.10 metres. És a dir, les capes granulars de gruix inferior a 0.10 m no es consideren. Aquest criteri d'unió dels estrats s'ha variat durant el càlcul, considerant gruixos de capes granulars de 0.05 i 0.15 m, per tal d'observar la sensibilitat dels resultats.
- La matriu que forma el sistema a resoldre és una matriu que té com a columnes les derivades parcials de l'equació de deformacions en funció dels paràmetres a ajustar. Com que la quantitat de paràmetres que intervenen és variable, la matriu també ho és.
- Passa el mateix amb la subrutina de càlcul de deformacions, els paràmetres que hi intervenen depenen de la situació estudiada.
- S'ha vist que, com a mínim, intervenen 6 paràmetres i com a màxim 11. El programa té subrutines per calcular les matrius i les deformacions segons els paràmetres que hi intervenen. La variació en la quantitat de paràmetres depèn bàsicament de la litologia. Un cop fixada aquesta intervenen el temps i el nivell de càrrega, el primer indica a quina fase de consolidació estem i el segon quants paràmetres de consolidació secundària intervenen a l'equació.

5.2.2 Comprovació del funcionament del programa.

Abans de procedir a l'obtenció dels paràmetres que caracteritzen el comportament del sòl, es decideix fer una comprovació del funcionament del mateix per tal de comprovar-ne el bon funcionament.

Aquesta comprovació consistirà a crear unes dades de deformació fictícies, utilitzant uns paràmetres qualsevol. Aquestes dades de deformació estan relacionades amb un assaig concret i a una disposició estratigràfica fixada prèviament.

Amb aquestes dades de deformacions generades i partint d'uns paràmetres diferents, es comprova la convergència del mètode de càlcul per als assaigs considerats.

La comprovació s'ha realitzat sobre un assaig concret, el CPTu 18 (extern a la zona test de la precàrrega).

Els paràmetres que s'han utilitzat per a la generació de les deformacions que es fan servir com a dades estan a la Taula 5-6.

Taula 5-6. Valors dels paràmetres considerats en els càlculs d'assentaments de la comprovació.

	Llims		Sorres_1		Sorres_2		Argiles				
Paràmetre	α_{lim}	c_{α}^{lim}	α_{s1}	c_{α}^{s1}	α_{s2}	c_{α}^{s2}	C_c	C_s	c_v	a	b
Unitats	---	---	---	---	---	---	---	---	cm ² /s	---	---
Valor	2.5	0.075	6	0.15	12	0.1	0.25	0.12	0.003	0.008	13

Els resultats que s'obtenen un cop feta la comprovació són els que es presenten a la Taula 5-7.

Estudi conjunt dels assaigs de penetració estàtica i de les deformacions del terreny

La columna anomenada variació fa referència a la diferència, en percentatge, entre el paràmetre obtingut finalment respecte del paràmetre que hauria de donar, que hauria de ser el que s'ha fet servir inicialment per generar el model i calcular les deformacions. Correspon a la següent expressió:

$$Variació = \left| \frac{\text{paràmetre}_{final} - \text{paràmetre}_{generació}}{\text{paràmetre}_{generació}} \cdot 100 \right| \quad (5.36)$$

Taula 5-7. Paràmetres obtinguts amb la comprovació. La columna de variació indica la desviació respecte del valor de generació del model, no respecte del valor inicial.

Material	Paràmetre	Unitats	Valor de generació del model	Valor inicial del càlcul	Valor final del càlcul	Variació
Llims	α_{lim}	---	2.5	2	2.505	0.22 %
	c_{α}^{lim}	---	0.075	0.01	0.078	3.61%
Sorres_1	α_{s1}	---	6	5	5.989	0.18 %
	c_{α}^{s1}	---	0.15	0.32	0.150	0.02 %
Sorres_2	α_{s2}	---	12	10	11.944	0.47 %
	c_{α}^{s2}	---	0.1	0.12	≈ 0.10	0.03 %
Argiles	C_c	---	0.25	0.35	0.242	3.08 %
	C_s	---	0.12	0.01	0.116	3.61 %
	c_v	cm ² /s	0.003	0.004	0.004	33.40 %
	a	---	0.008	0.009	0.008	1.64 %
	b	---	13	2	12.899	0.78 %

Per altra banda també es pot representar gràficament la variació de cadascun d'aquests paràmetres durant el procés iteratiu del programa, ja una senyal de bon funcionament del programa és que els paràmetres tendeixin al valor que s'ha utilitzat per generar el model.

A les figures següents es mostren aquestes variacions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_1 (α_{s1}) amb les iteracions.

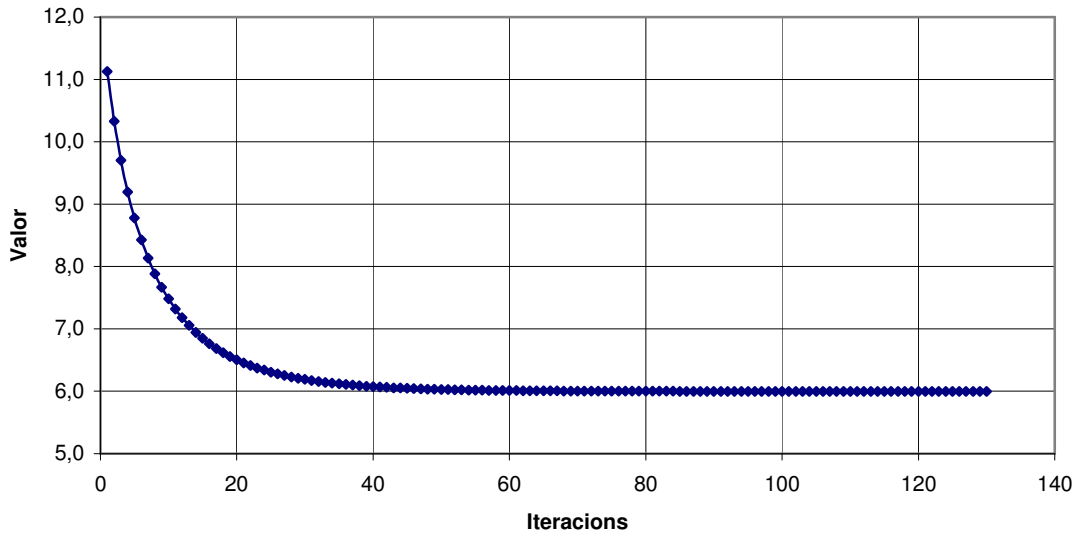


Figura 5-9. Variació de α_{s1} amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_2 (α_{s2}) amb les iteracions.

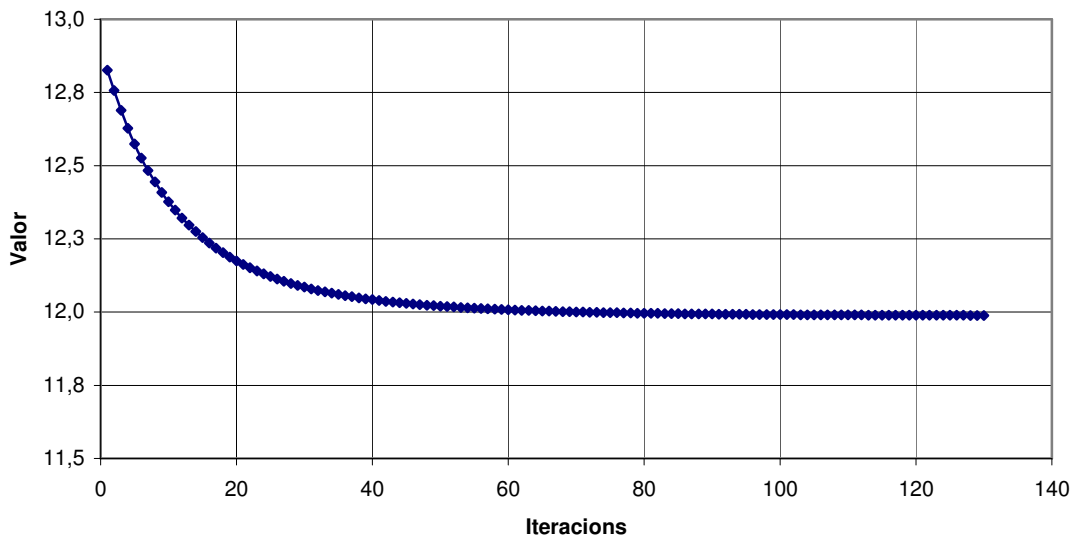


Figura 5-10. Variació de α_{s2} amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_3 (α_{lim}) amb les iteracions.

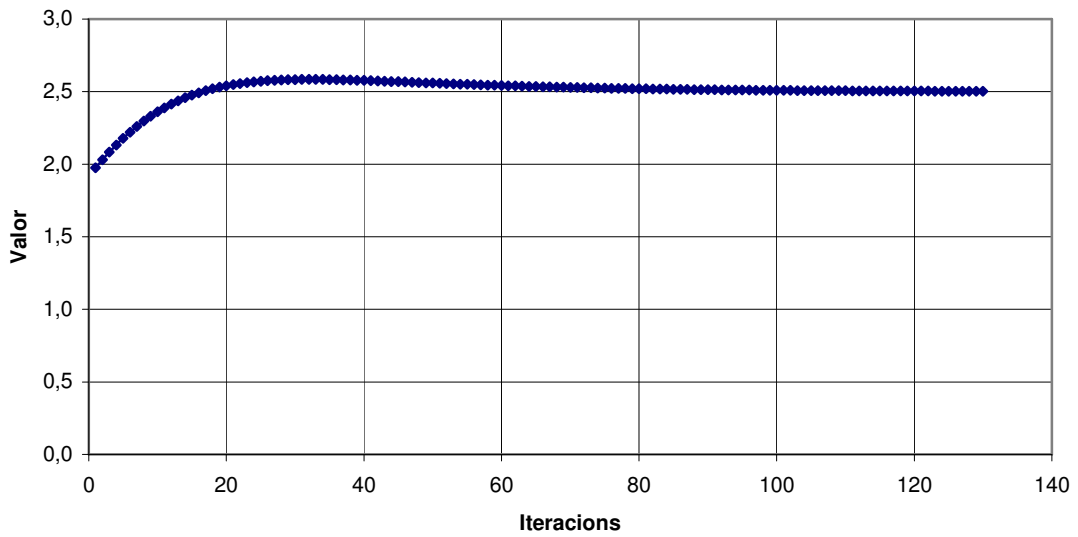


Figura 5-11. Variació de α_{lim} amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_4 (c_c) amb les iteracions.

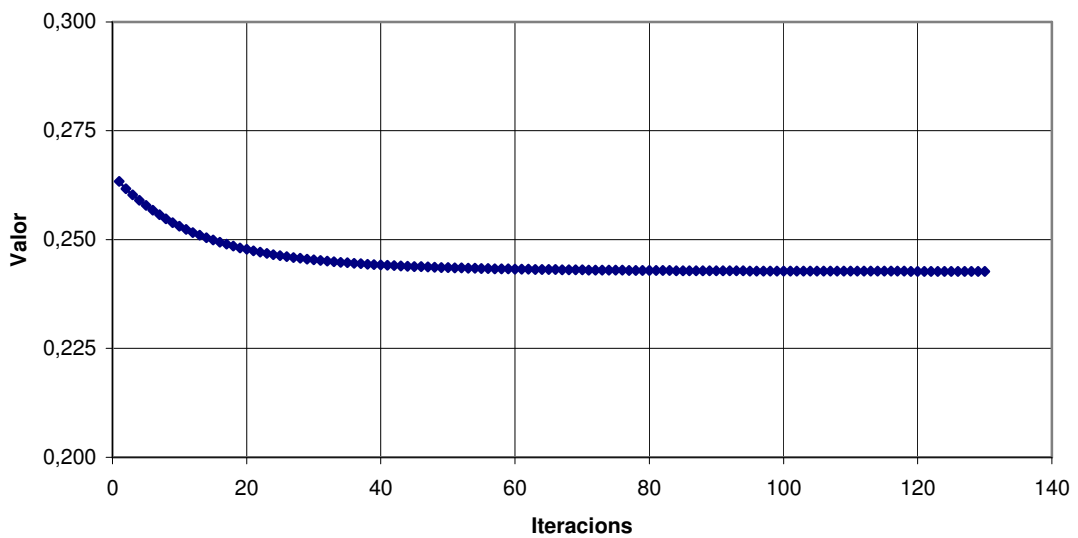


Figura 5-12. Variació de C_c amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_5 (c_s) amb les iteracions.

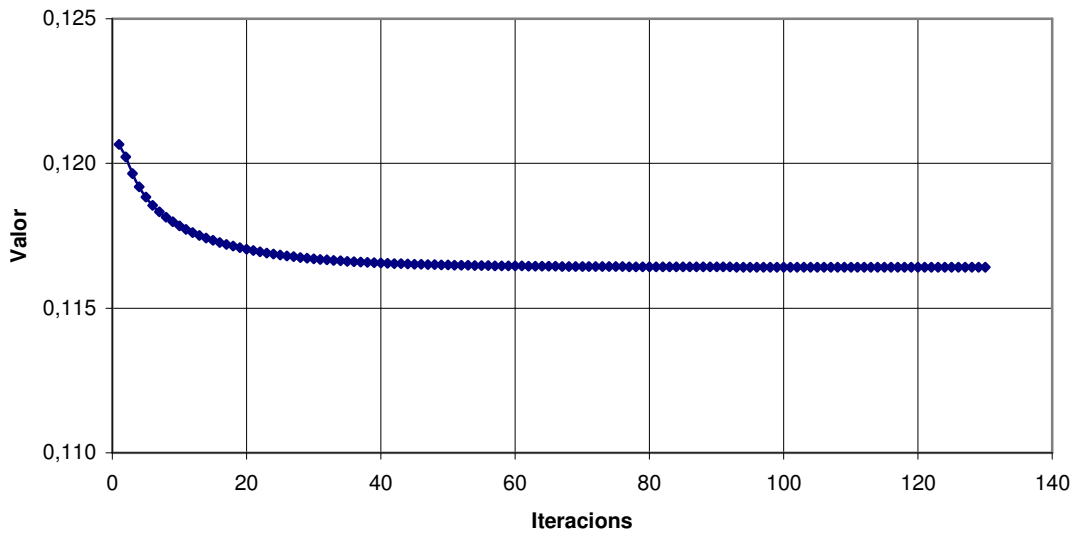


Figura 5-13. Variació de C_s amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_6 (c_v , en cm^2/s) amb les iteracions.

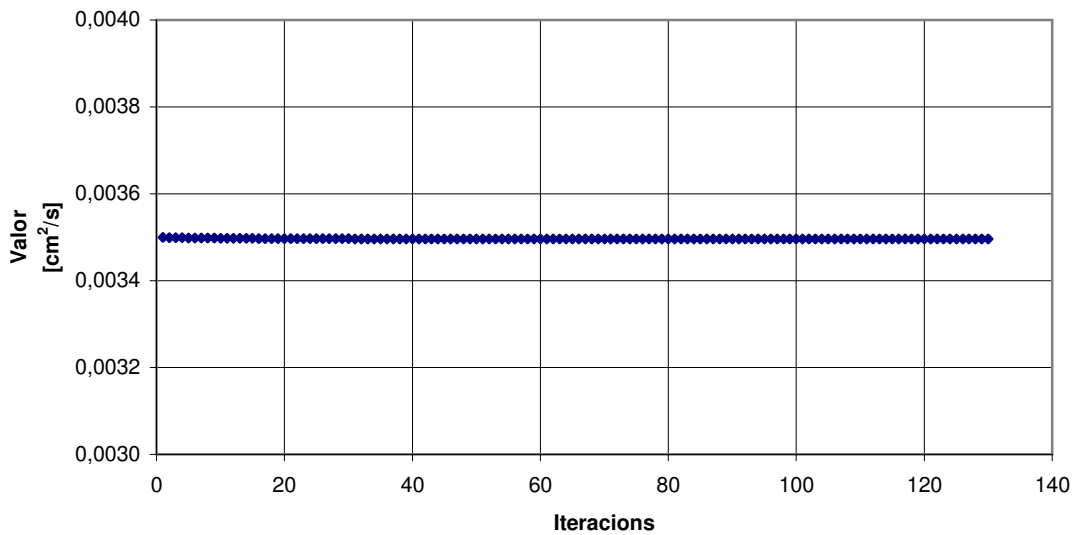


Figura 5-14. Variació de C_v amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_7 (a) amb les iteracions.

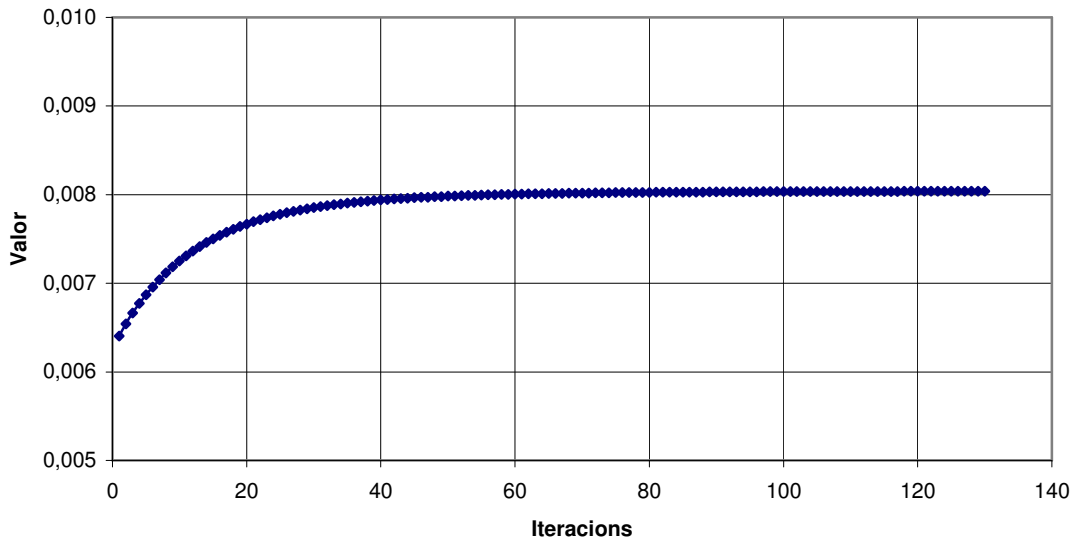


Figura 5-15. Variació de a amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_11 (b) amb les iteracions.

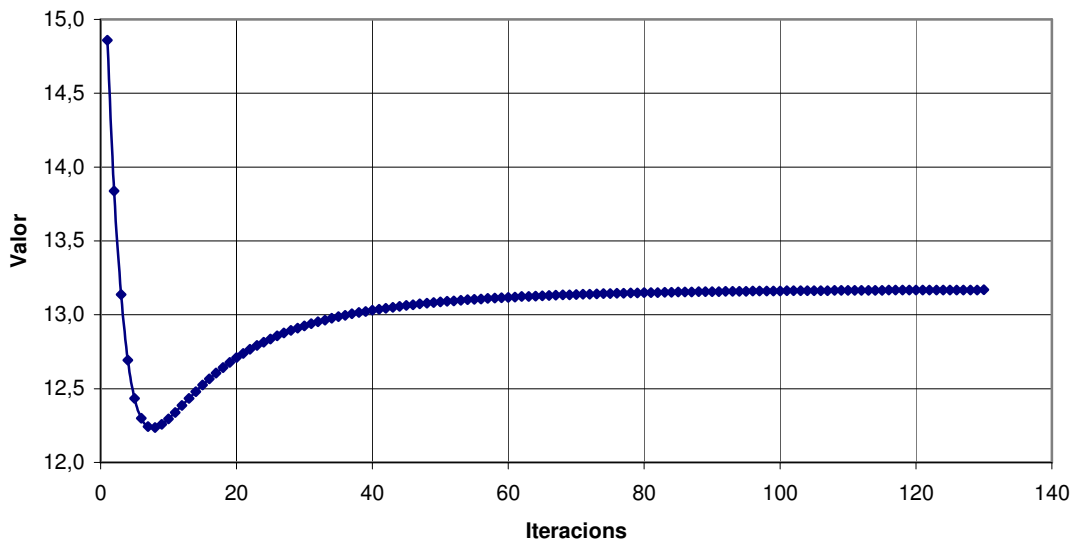


Figura 5-16. Variació de b amb les iteracions.

CPTu 18. Variació de c_{α} amb les iteracions.

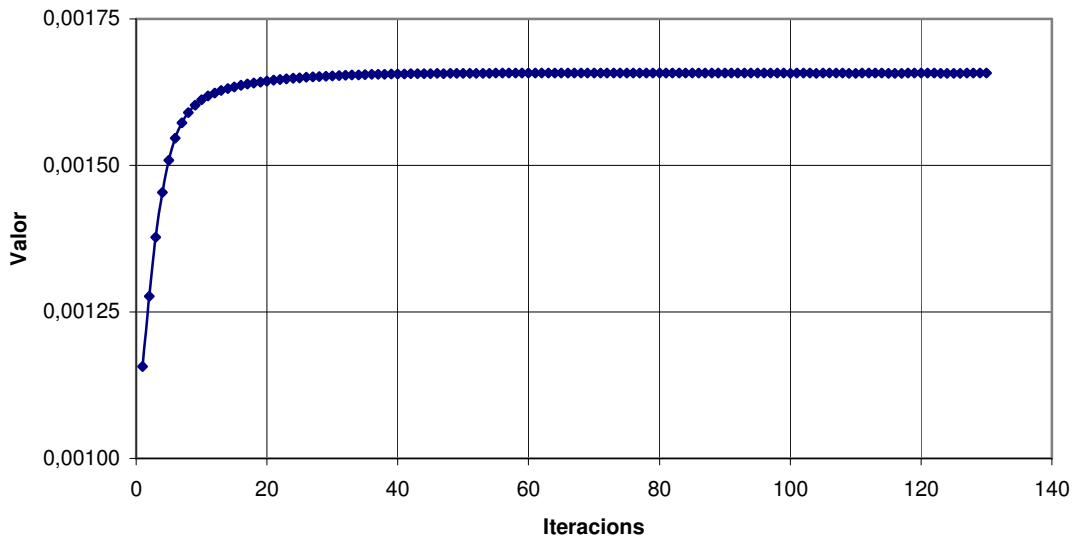


Figura 5-17. Variació de c_{α} amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_8 ($c_{\alpha s1}$) amb les iteracions.

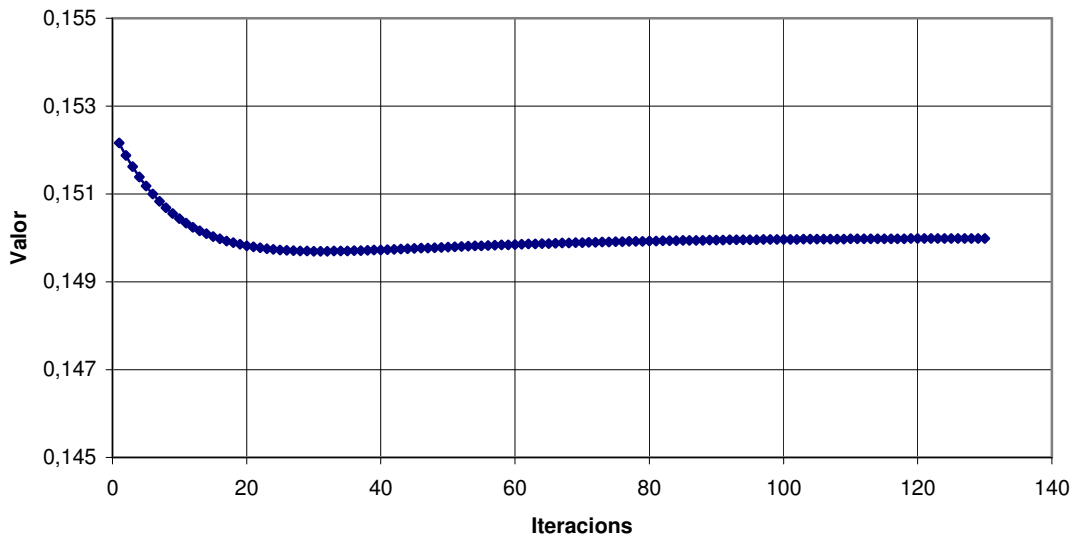


Figura 5-18. Variació de $c_{\alpha s1}$ amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_9 ($c_{\alpha s2}$) amb les iteracions.

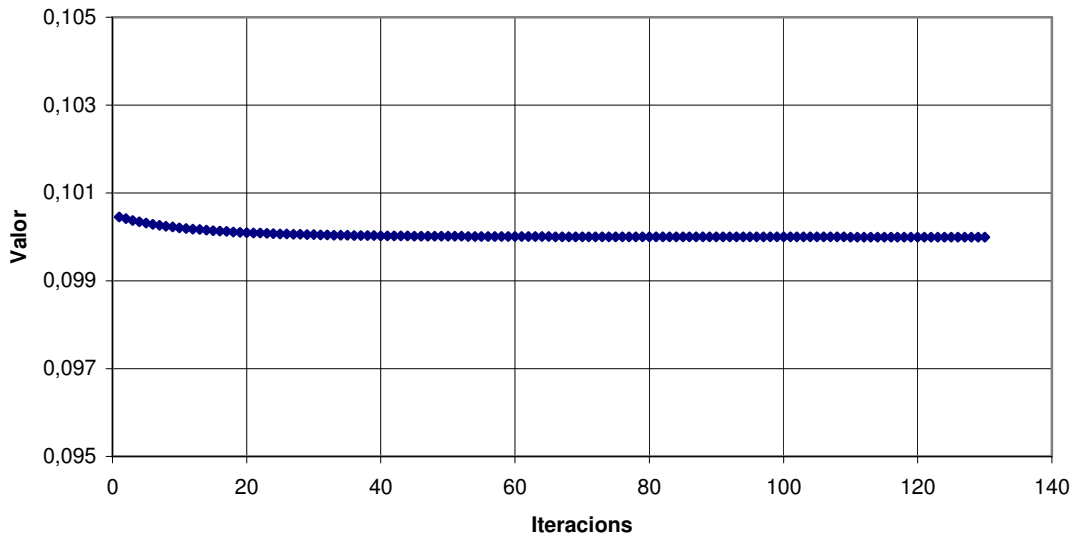


Figura 5-19. Variació de $c_{\alpha s2}$ amb les iteracions.

CPTu 18. Variació del paràmetre_10 ($c_{\alpha llim}$) amb les iteracions.

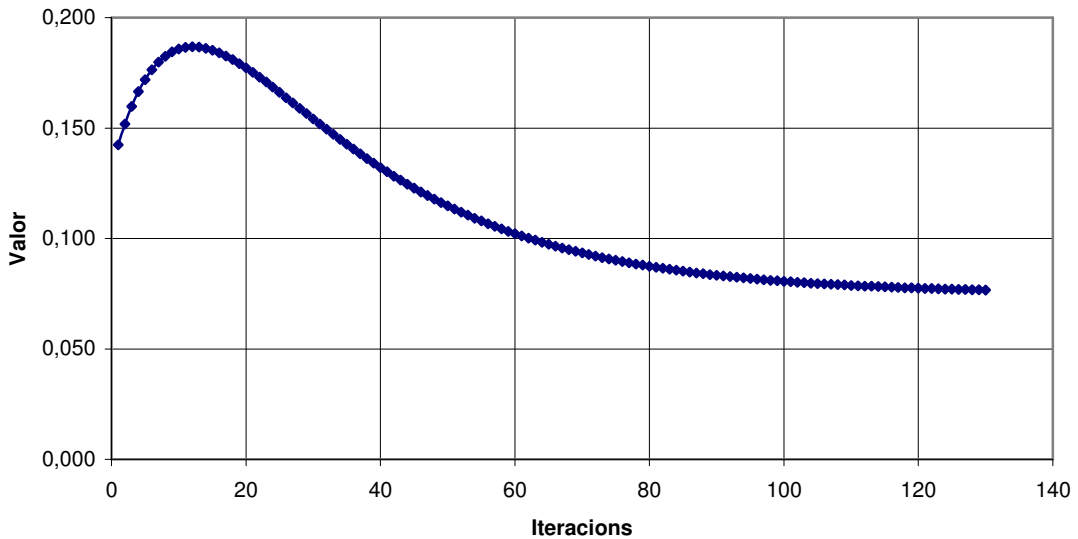


Figura 5-20. Variació de $c_{\alpha llim}$ amb les iteracions.

També es calcula l'error total que es comet amb aquesta aproximació. Aquest error s'expressa amb la següent fórmula:

$$Error_total = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{def(i) - aprox(i)}{def(i)} \right)^2}{n}} \quad (5.37)$$

On def(i) és el valor de la deformació real al tram i-èssim de l'assaig, aprox(i) és la deformació calculada amb els paràmetres aproximats a cada iteració i n és el número total de trams que componen l'assaig.

Amb tot això, l'error total que s'obté al finalitzar les iteracions, en aquest cas, és de 0,0043.

A la figura 5-21 es representa l'evolució d'aquest error durant el procés iteratiu del programa, per dues proves diferents.

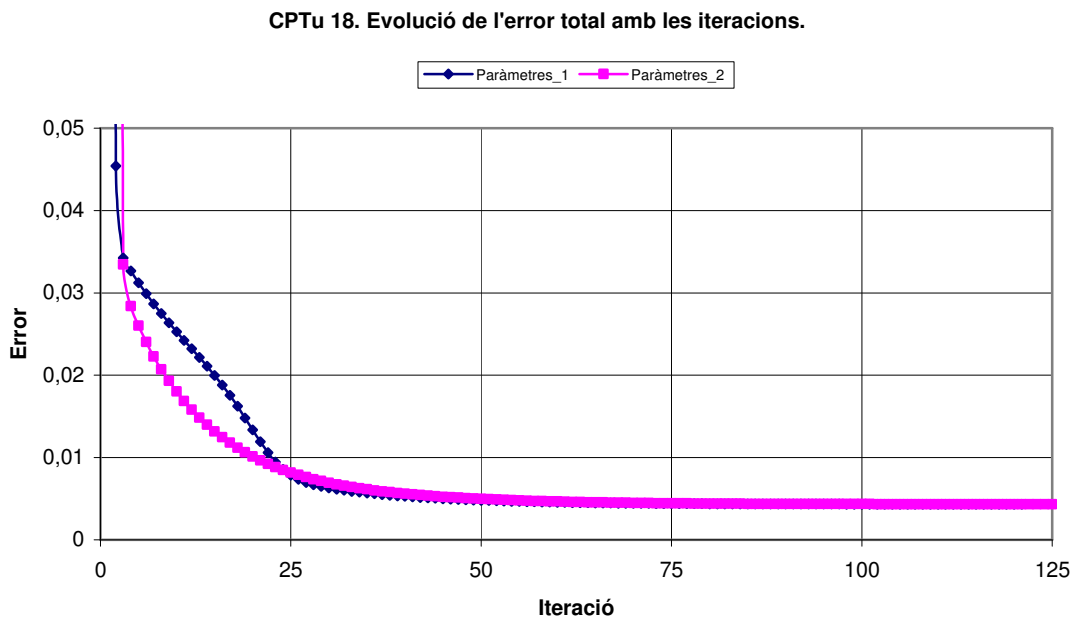


Figura 5-21. Variació de l'error total comès amb les iteracions.

A la Taula 5-8 i Taula 5-9 a la es llisten els paràmetres de generació del model, els paràmetres inicials dels càlcul, els paràmetres finals i la variació entre el valor de generació i el resultat final, per a les dues situacions provades, les anomenades Paràmetres_1 i Paràmetres_2.

La situació Paràmetres_2 és la que s'ha considerat millor i de la què s'han analitzat les variacions dels paràmetres vistes anteriorment.

Taula 5-8. Paràmetres obtinguts amb la comprovació Paràmetres_1.

Material	Paràmetre	Valor de generació del model	Valor inicial del càlcul	Valor final del càlcul	Variació
Llims	α_{lim}	2.5	2	2.505	0.22 %
	C_{α}^{lim}	0.075	0.01	0.078	3.53%
Sorres_1	α_{S1}	6	7	5.989	0.18 %
	C_{α}^{S1}	0.15	0.32	0.150	0.02 %
Sorres_2	α_{S2}	12	15	11.944	0.47 %
	C_{α}^{S2}	0.1	0.12	≈ 0.10	0.03 %
Argiles	C_c	0.25	0.35	0.242	3.08 %
	C_s	0.12	0.01	0.116	3.61 %
	C_v	0.003	0.004	0.004	32.84 %
	a	0.008	0.001	0.008	1.64 %
	b	13	2	12.899	0.78 %

Taula 5-9. Paràmetres obtinguts amb la comprovació Paràmetres_2.

Material	Paràmetre	Valor de generació del model	Valor inicial del càlcul	Valor final del càlcul	Variació
Llims	α_{lim}	2.5	2	2.505	0.22 %
	C_{α}^{lim}	0.075	0.01	0.078	3.61%
Sorres_1	α_{S1}	6	5	5.989	0.18 %
	C_{α}^{S1}	0.15	0.32	0.150	0.02 %
Sorres_2	α_{S2}	12	10	11.944	0.47 %
	C_{α}^{S2}	0.1	0.12	≈ 0.10	0.03 %
Argiles	C_c	0.25	0.35	0.242	3.08 %
	C_s	0.12	0.01	0.116	3.61 %
	C_v	0.003	0.004	0.004	33.40 %
	a	0.008	0.009	0.008	1.64 %
	b	13	2	12.899	0.78 %

A tots els casos estudiats s'ha comprovat que hi ha una reducció de l'error comès a mida que s'incrementen les iteracions realitzades; simultàniament hi ha una convergència dels paràmetres ajustats al seu valor inicial.

L' excepció a aquest comportament és el coeficient de consolidació vertical c_v que roman pràcticament estable, sense variació sigui quin sigui el seu valor inicial.

Degut al comportament anòmal d'aquest paràmetre, es fa un estudi més acurat de la seva variació prenent altres valors inicials per veure com afecta això al valor final i a l'error que es comet. El resultat és el que es presenta a la figura 5-22.

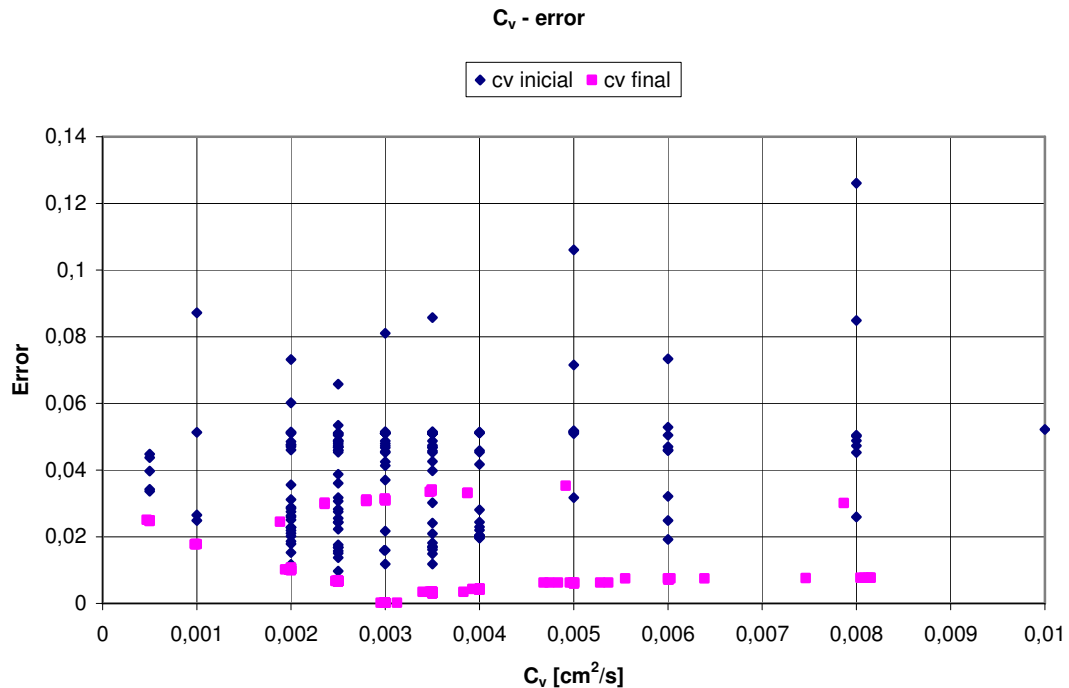


Figura 5-22. Estudi de la variació del valor inicial de c_v i de l'error comès.

Com es veu en aquesta gràfica la variació que pateix c_v en el procés es produeix pràcticament sobre la vertical del valor inicial; és a dir, la variació de valor és molt petita i l'error es redueix degut a l'ajust de la resta de paràmetres implicats de manera que, en algun dels casos representats, es veu com l'error que es comet és pràcticament nul.

A més a més, alguns valors inicials presenten una duplictat de valors finals, que únicament difereixen en el valor de l'error final.

Per comprovar la bondat de l'ajust realitzat a la figura 5-23 es presenten les comparacions dels resultats obtinguts amb els paràmetres ajustats amb les dades reals de deformació, per a dues situacions temporals diferents.

Com es pot veure l'ajust és molt bo a gairebé totes les zones de l'assaig. També s'observa que l'ajust s'adapta a l'increment de les deformacions amb el pas del temps.

Tot això indica que el procediment de càlcul utilitzat és correcte i funciona de manera adequada.

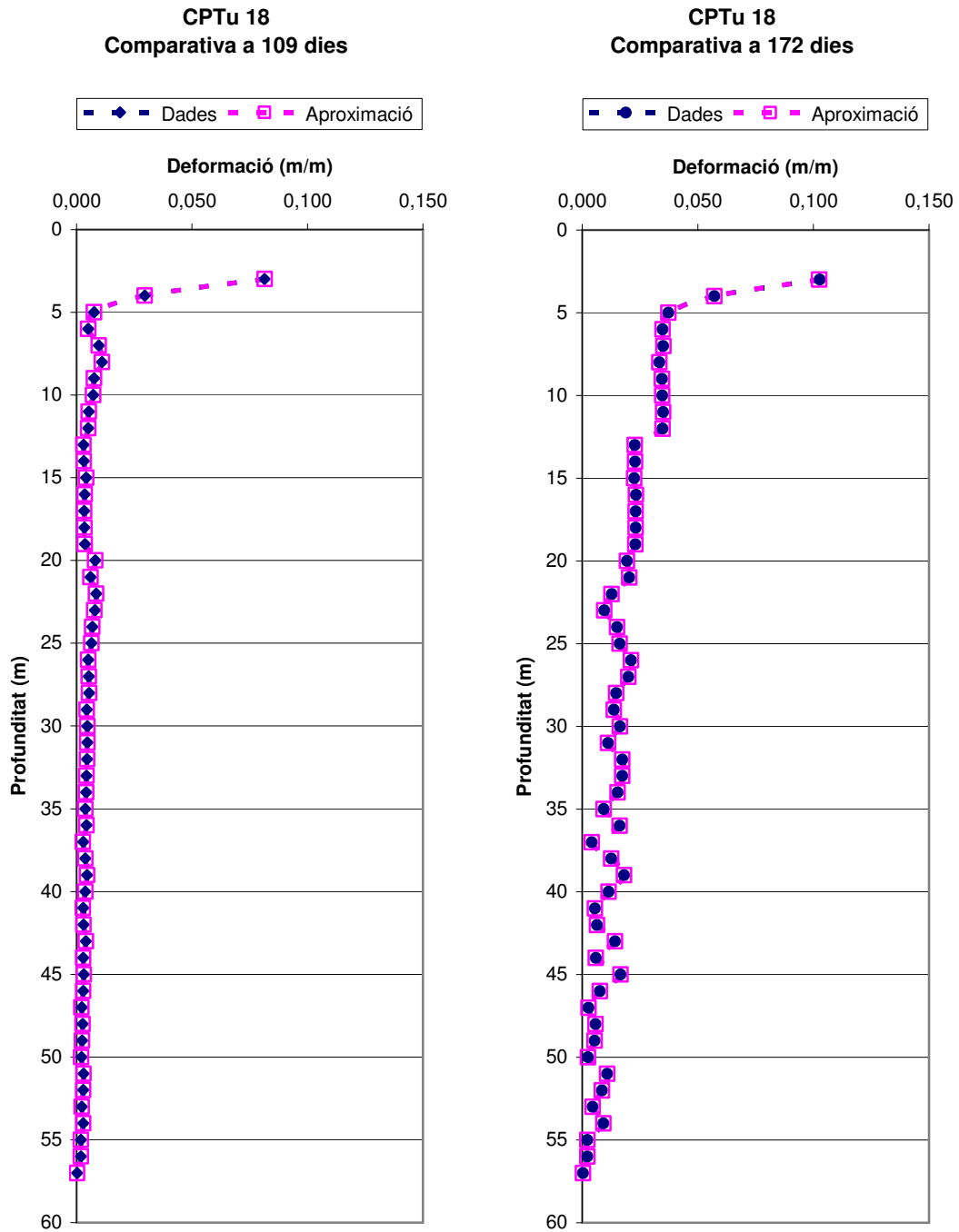


Figura 5-23. CPTu 18. Comparació entre les dades reals i les calculades amb l'ajust per a dues fases temporals diferents.

5.3 Resultats obtinguts amb dades reals.

5.3.1 Dades de la zona test.

Un cop s'ha assegurat el bon funcionament del programa es procedeix al càlcul del casos reals, centrant-nos en els realitzats a la zona test de la precàrrega, es a dir, el CPTu 2, el CPTu 4 i el CPT 3, i en aquells assaigs de penetració estàtica que tenen a prop un extensòmetre lliscant.

El procés de càlcul ha sigut el ja esmentat en aquest mateix capítol però estudiant la sensibilitat dels resultats a dos factors com són el gruix mínim dels estrats de material granular i de la consideració del t_{90} fixat a 90 dies o al mínim calculat pel programa. D'altra banda es realitza l'estudi per a diferents valors de c_v per intentar veure quin és el valor més adient ja que, tal i com s'ha comentat, c_v pràcticament no pateix variació durant el procés iteratiu.

El procediment de càlcul és el següent:

- Es fixa el valor de c_v entre 0.001 i 0.006.
- Hi ha 6 situacions de càlcul diferents, segons quin sigui el gruix dels materials granulars considerats i de si el t_{90} està fixat o és el calculat pel programa, que queden definides a la Taula 5-10.

Taula 5-10. Resum de les propietats de les diferents situacions de càlcul estudiades.

	Gruix dels materials granulars [m]	Valor de t_{90}
Situació a	0.03	Fixat
Situació b	0.03	Calculat
Situació c	0.05	Fixat
Situació d	0.05	Calculat
Situació e	0.10	Fixat
Situació f	0.10	Calculat

A les taules següents es presenten els errors obtinguts per a cada assaig, indicant en negreta el valor mínim assolit.

Taula 5-11. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 2.

c_v [cm²/s]	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
Situació a	28.78%	197.87%	29.55%	21.84%	13.39%	19.08%
Situació b	45.64%	44.59%	45.05%	44.80%	30.36%	42.16%
Situació c	28.58%	29.42%	29.10%	21.83%	13.39%	18.94%
Situació d	45.64%	44.59%	45.05%	196.02%	27.58%	42.23%
Situació e	28.58%	29.42%	29.10%	21.83%	13.39%	18.94%
Situació f	45.64%	N/C	N/C	N/C	27.58%	42.23%

N/C: indica que aquest cas no ha estat calculat.

Taula 5-12. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 4.

c_v [cm ² /s]	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
Situació a	63.61%	63.61%	62.58%	62.67%	65.86%	62.62%
Situació b	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
Situació c	63.61%	63.61%	62.58%	62.67%	62.67%	62.62%
Situació d	63.34%	73.18%	73.46%	62.53%	62.33%	63.89%
Situació e	63.53%	62.86%	62.48%	62.84%	62.87%	62.76%
Situació f	62.18%	73.16%	61.81%	63.37%	62.22%	64.00%

N/C: indica que aquest cas no ha estat calculat.

Taula 5-13. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPT 3.

c_v [cm ² /s]	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
Situació a	20.83%	20.14%	27.09%	27.30%	27.31%	27.34%
Situació b	21.43%	21.41%	21.68%	21.68%	29.40%	29.79%
Situació c	21.26%	20.75%	20.16%	20.16%	19.94%	19.76%
Situació d	21.58%	21.49%	21.69%	21.76%	21.80%	21.84%
Situació e	21.53%	21.84%	21.67%	21.48%	21.30%	21.39%
Situació f	21.44%	21.72%	21.64%	21.55%	21.48%	21.36%

Es decideix que els assaigs tals que el seu error superi el 20% seran descartats al considerar-los poc representatius. D'aquesta manera, els resultats obtinguts amb el CPTu 4 queden eliminats.

A la Taula 5-14 es presenta el llistat de paràmetres obtinguts amb el CPTu 2 i amb el CPT 3, que es consideren vàlids.

Taula 5-14. Valors dels paràmetres obtinguts.

Paràmetre	Unitats	Assaig considerat	
		CPT 3	CPTu 2
α_{lim}	---	5496.14	582.33
E_{lim}	MPa	8075.53	121.64
C_{α}^{lim}	---	0.00092	0.00025
α_{S1}	---	7.98	19.56
E_{S1}	MPa	85.68	174.17
C_{α}^{S1}	---	0.00041	0.00104
α_{S2}	---	3.69	21.05
E_{S2}	MPa	30.79	158.34
C_{α}^{S2}	---	0.00462	0.00499
C_c	---	0.18960	0.00134
C_s	---	1.8915E-08	0.00936
C_v	Cm ² /s	0.00635	0.00096
a	---	0.00255	0.00024
b	---	13	2.35
OCR màxim		1.096	1.153
C_d	---	0.00237	0.000237

A la figura 5 – 24 es presenten els resultats dels ajusts realitzats en dues fases temporals diferents per al CPTu 2.

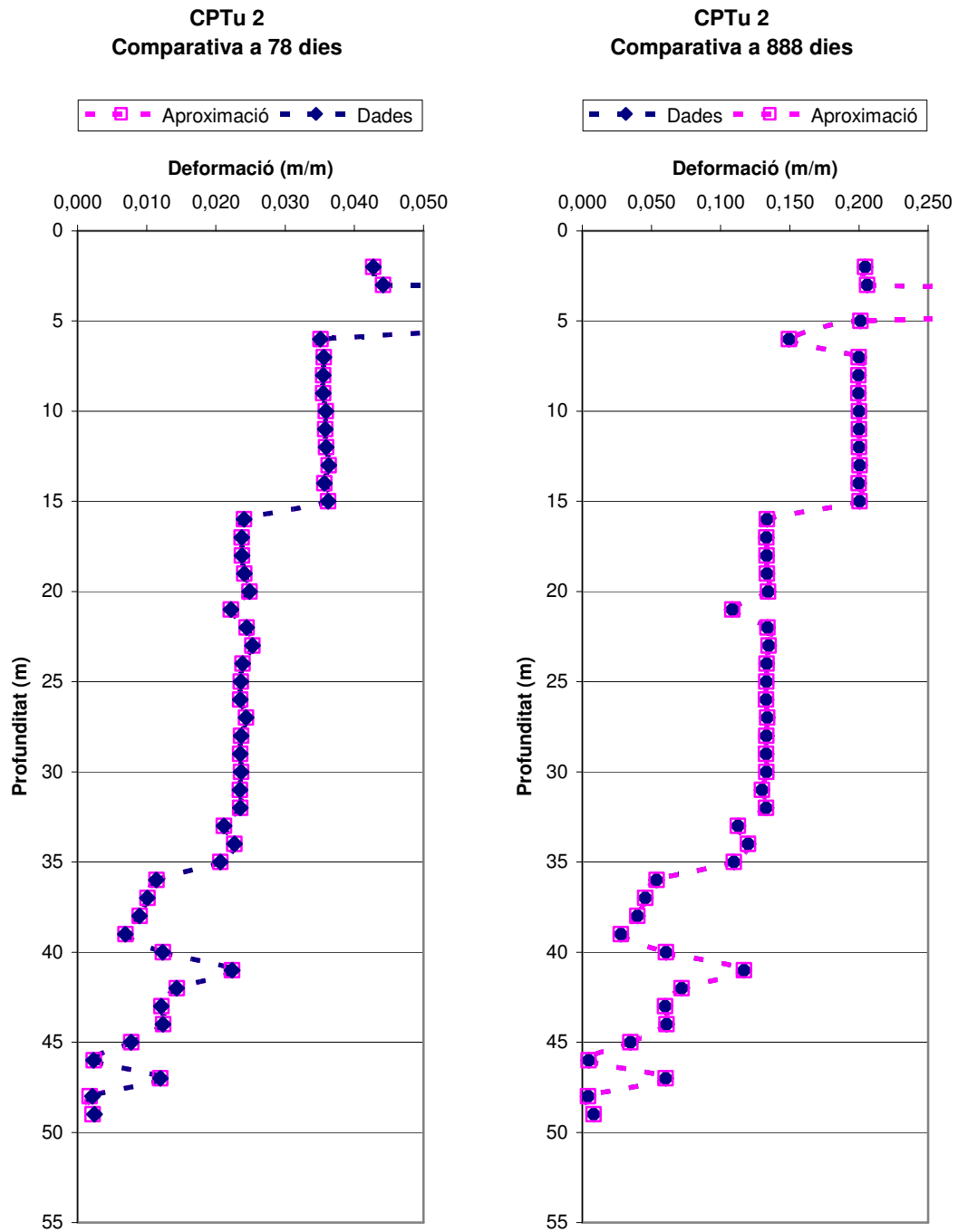


Figura 5-24. CPTu 2. Comparació entre les dades reals i les calculades amb l'ajust per a dues fases temporals diferents.

A la figura anterior es veu com l'ajust als valors deformacionals es molt bó. Només als punts de profunditat elevada (més de 40 metres) hi ha petites diferències a temps baixos, que desapareixen amb l'avanç del temps.

5.3.2 Resultats amb altres assaigs.

A les taules següents es presenta un llistat dels resultats obtinguts amb assaigs que estaven fora de la zona test.

Taula 5-15. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 18.

c_v [cm²/s]	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
Situació a	8.55%	8.49%	8.43%	8.43%	8.46%	8.47%
Situació b	19.44%	22.55%	24.57%	27.10%	26.84%	26.82%
Situació c	8.57%	8.53%	8.49%	8.50%	8.54%	8.53%
Situació d	19.45%	22.46%	24.54%	25.06%	25.32%	25.50%
Situació e	13.67%	13.68%	13.65%	13.65%	13.72%	13.71%
Situació f	19.11%	22.17%	24.33%	24.78%	25.04%	25.13%

Taula 5-16. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 19.

c_v [cm²/s]	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
Situació a	32.63%	36.14%	36.14%	36.14%	36.14%	36.14%
Situació b	150.41%	N/C	216.81%	N/C	N/C	244.18%
Situació c	33.12%	11.94%	12.18%	12.59%	12.69%	12.66%
Situació d	148.51%	196.24%	0.00%	0.00%	0.00%	240.79%
Situació e	33.12%	11.94%	12.18%	12.59%	12.69%	12.66%
Situació f	148.51%	N/C	N/C	N/C	N/C	240.79%

N/C: indica que aquest cas no ha estat calculat.

Taula 5-17. Resultats obtinguts amb les situacions abans definides pel CPTu 36.

c_v [cm²/s]	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
Situació a	70.25%	70.25%	70.25%	70.25%	70.25%	70.25%
Situació b	145.50%	156.98%	163.70%	168.46%	172.14%	175.16%
Situació c	70.25%	70.25%	70.25%	70.25%	70.25%	70.25%
Situació d	145.50%	156.98%	163.70%	168.46%	172.14%	175.16%
Situació e	71.62%	71.62%	71.62%	71.62%	71.62%	71.62%
Situació f	144.70%	156.08%	162.74%	167.47%	171.13%	174.12%

Val a dir que aquests no són els resultats definitius obtinguts perquè s'han realitzats proves amb diferents sobrecàrregues de terres. Inicialment estava previst considerar que a tots els punts exteriors a la zona test, la sobrecàrrega de terra seria la mateixa i valdria 8 t/m², és a dir, un terraplè de 4 metres d'alçada i aquests són els resultats que hi ha reflexats a les taules anteriors.

A partir de la situació òptima obtinguda, es fa un estudi variant lleugerament la sobrecàrrega aplicada al terreny per tal de veure la millora dels resultats. Els resultats són els que es veuen a la Taula 5-18.

Taula 5-18. Error mínim comès amb variacions de l'alçada del terraplè de precàrrega per als diferents assaigs considerats.

	Alçada del terraplè [m]	Error comès [%]
CPTu 18	3.5	7.90
CPTu 19	1.5	11.44
CPTu 36	0.5	50.85

Estudi conjunt dels assaigs de penetració estàtica i de les deformacions del terreny

Amb aquests resultats descartem directament els resultats del CPTu 36, per tenir un error molt superior al 20% fixat com a límit. Els valors dels paràmetres que s'obtenen dels assaigs vàlids estan a la Taula 5-19.

Taula 5-19. Valors dels paràmetres obtinguts.

Paràmetre	Assaig considerat	
	CPTu 18	CPTu 19
α_{lim}	1.98	2.21
E_{lim} [MPa]	0.75318	1.61
c_{α}^{lim}	0.14666	1.03
α_{S1}	4.92	3.29
E_{S1} [MPa]	37.13	33.10
c_{α}^{S1}	0.05104	0.00747
α_{S2}	136.27	18.63
E_{S2} [MPa]	662.07	55.19
c_{α}^{S2}	0.01907	0.00350
c_c	0.35108	0.23017
c_s	0.06111	0.02904
c_v [cm ² /s]	0.004	0.00030
a	0.00077	0.00222
b	72.06	17.52
OCR màxim	1.18	1.16
c_o	0.00069	0.00201

5.4 Comentaris finals

Si fem un breu resum dels càlculs anteriors veiem que els millors resultats s'obtenen en situacions amb t_{90} fixat i amb un gruix molt petit d'assimilació de materials granulars dintre dels cohesius.

També s'observa que els valors de c_v inicials són diferents a cada cas. Això es veu a la Taula 5-20.

Taula 5-20. Resum dels resultats obtinguts.

Assaig	Error [%]	c_v inicial [cm ² /s]	Alçada terraplè [m]	Resum situació de càlcul	
				Gruix mínim dels materials granulars [m]	T90
CPT 3	19.76	0.006	4	0.03	Fixat
CPTu 2	13.39	0.005	4	0.05	Fixat
CPTu 18	7.90	0.004	3.5	0.05	Fixat
CPTu 19	11.44	0.002	1.5	0.05	Fixat

6 Conclusions

6.1 Classificació del sòl amb les dades dels assaigs de penetració estàtica

Donada la gran quantitat de valors dels que es disposa el valor que es fa servir a la classificació és la mitjana de les dades obtingudes dels assaigs que estan dintre del tram d'un metre que es vol classificar. Això fa que si el tram té una composició homogènia les dades tinguin poca dispersió i el punt equivalent sigui molt representatiu, però si és un tram heterogeni, la dispersió del valors és molt més gran i la representativitat no resulta tan bona.

En general, s'observa que a totes les classificacions es verifica la seqüència granodecreixent dels materials; el tram 2 sempre queda classificat com a material principalment granular, el tram 3 com una barreja de materials granulars i cohesius i el tram 4 com a material bàsicament cohesiu.

El tram 1 és que ofereix més dificultat a l'hora de classificar-lo, presenta massa heterogeneïtat, hi ha punts que no poden ser classificats i és on s'obtenen els resultats més rars, amb punts classificats com sòls sensitius o sorres metaestables.

Pel que fa a les classificacions individualment veiem el següent:

- La classificació de Douglas i Olsen funciona prou bé, perquè fa servir paràmetres directes dels assaigs però els resultats obtinguts poden ser confusos degut a que hi ha importants interseccions entre les zones que defineix.
- La classificació de Senneset, Sandvern i Janbu no ha donat gaire bons resultats: hi ha varis punts que no entren a les zones definides i el fet de utilitzar el coeficient de pressió de porus B_q , amb valors força erronis tal i com ja s'ha comentat, ha fet que la classificació dels materials tingui una tendència cap a materials més rígids dels que indiquen els reconeixements de camp.
- La classificació de Robertson de 1986 funciona bé, sobretot si només ens fixem en la taula $R_f - q_t$. La taula $B_q - q_t$ presenta els mateixos problemes observat a la classificació de Senneset i Janbu, i es veu de manera més clara la tendència a la rigidització dels materials.
- La classificació de Robertson de 1990 li passa exactament el mateix que a la de Robertson de 1986, funciona bé, sobretot si només ens fixem en la taula $F_r - Q_t$, mentre que a la taula $B_q - Q_t$ es veu la tendència a la rigidització dels materials esmentada anteriorment.
- La classificació de Jefferies i Davies no funciona bé en la classificació del tram 1 i del tram 4. En aquest darrer tram classifica molts punts com a sòls orgànics.

En definitiva, cap de les classificacions utilitzades funciona prou correctament però les que utilitzen paràmetres hidràulics del terreny per a classificar-lo presenten errades més importants.

Conclusions.

6.2 Correlacions amb les dades dels assaigs de penetració estàtica

La sensibilitat, S_t , dels llims superficials resulta molt dolenta; millora lleugerament pel que fa a les argiles i, sobretot, a les argiles més profundes. Destacar que els valors obtinguts del CPT 3 difereixen força dels obtinguts amb els CPTu 2 i CPTu 4.

La pressió de preconsolidació, p'_c , no es determina de manera correcta en els dos assaigs estudiats ni pels materials considerats.

Les correlacions amb l'OCR mostren unes característiques molts curioses. Per una banda, es remarcable el fet que algunes de les correlacions només siguin aplicables a una quantitat molt poc significativa de punts, el que fa que els valors obtinguts no siguin més que dades puntuals difícilment extrapolables a la resta de l'assaig; per altra banda, les correlacions menys restrictives en quant a condicions d'aplicabilitat, en definitiva les que més resultats proporcionen, donen uns resultats molt dolents.

Relacionat amb l'OCR es pot dir que la variació de B_q amb la fondària indica la presència de materials NC a la part inferior de la unitat argilosa. Tanmateix, aquest valor es contradiu amb la situació hidrogeològica plantejada, on l'explotació excessiva de l'aquífer inferior el que ha causat és el contrari, és a dir, que la base d'aquesta unitat estigui sobreconsolidada.

L'índex de compressibilitat, C_c , sembla el paràmetre que millor queda determinat amb aquestes correlacions, sobretot pel valors que s'obtenen per a les argiles i considerant el valor màxim. Els llims proporcionen pitjors resultats.

El mòdul edomètric, E_m , queda prou ben determinat a les argiles, als llims els resultats són pitjors.

Com ja passa amb les classificacions del sòl, les correlacions que utilitzen paràmetres hidràulics proporcionen resultats dolents o són difícilment aplicables, com en el cas de l'OCR.

És a dir, aquestes correlacions donen una idea general dels paràmetres però els valors que s'obtenen s'han d'agafar amb una certa precaució.

A la Taula 6-1 hi ha un resum dels resultats.

Taula 6-1. Resum dels paràmetres obtinguts amb les correlacions.

	Argiles	LLims
Sensibilitat, S_t	3.14	3.70
Pressió de preconsolidació, p'_c [MPa]	0.0405	0.004
Índex de compressibilitat C_c	0.199	0.166
Mòdul edomètric, E_m [MPa]	31.76	4.995

Conclusions.

6.3 Resultats obtinguts amb l'ajust per mínims quadrats

A la Taula 6-2 hi ha un resum dels resultats obtinguts amb el programa desenvolupat per a calcular els paràmetres del terreny.

Taula 6-2 . Resum dels paràmetres calculats.

Paràmetre	Assaig considerat				Valor mig	Mediana
	CPT 3	CPTu 2	CPTu 18	CPTu 19		
α_{lim}	5496.14	582.33	1.98	2.21	1520.66	292.27
E_{lim} [MPa]	8075.53	121.64	0.75318	1.61	2049.88	61.63
c_{α}^{lim}	0.00092	0.00025	0.14666	1.03	0.29446	0.07379
α_{S1}	7.98	19.56	4.92	3.29	8.94	6.45
E_{S1} [MPa]	85.68	174.17	37.13	33.10	82.52	61.46
c_{α}^{S1}	0.00041	0.00104	0.05104	0.00747	0.015	0.004
α_{S2}	3.69	21.05	136.27	18.63	44.91	19.84
E_{S2} [MPa]	30.79	158.34	662.07	55.19	226.60	106.77
c_{α}^{S2}	0.00462	0.00499	0.01907	0.00350	0.008	0.004
c_c	0.18960	0.00134	0.35108	0.23017	0.1923	0.2084
c_s	1.89E-08	0.00936	0.06111	0.02904	0.0249	0.0192
c_v [cm ² /s]	0.00635	0.00096	0.004	0.00030	0.0029	0.0025
a	0.00255	0.00024	0.00077	0.00222	0.0014	0.0015
b	13	2.35	72.06	17.52	25.73	14.26
OCR màxim	1.096	1.153	1.18	1.16	1.1475	1.155
c_a	0.00237	0.000237	0.00069	0.00201	0.00186	0.00219
Error [%]	19.76	13.39	7.90	11.44	---	---

El primer que cal comentar és que l'ajust s'ha realitzat sobre 7 assaigs però només s'han obtingut resultats que es consideren tolerables per a 4, i un d'ells és tolerable per molt poc. A més a més, les condicions que donen el millor ajust són diferents per a cadascun dels assaigs.

A més a més, els millors resultats s'obtenen amb dos assaigs que estan fora de la zona test de la precàrrega, el que fa pensar que la distribució de tensions no uniforme complica el càlcul.

Aquests resultats indiquen que, malgrat la validesa de l'ajust realitzat, els resultats no són bons.

Tan sols es podrien considerar ben ajustats alguns paràmetres de les argiles com l'índex de compressibilitat, C_c , i el paràmetre a de la consolidació secundària.

Pel que fa a la resta de materials, els llims superiors donen valors del paràmetres molt dolents.

Als dos tipus de sorres, els resultats també són dolents especialment els de les sorres inferiors (Sorra_2). Malgrat tot, els resultats confirmen la major rigidesa d'aquestes respecte de les sorres superiors, com indicaven altres models.

6.4 Conclusions finals

En aquest apartat el què es pretén fer és un comentari unitari de tots els resultats obtinguts pels dos mètodes utilitzats, d'una banda els paràmetres i altra informació que s'obtenen per correlació empírica amb dades dels assaigs de caracterització del terreny i per altra banda, els paràmetres deformatonals del sòl obtinguts amb un ajust per mínims quadrats.

Cal tenir present que amb el primer mètode només es pretenen determinar paràmetres dels materials cohesius ja que es veu que són els que més deformació patiran, no de la totalitat de materials, mentre que amb el segon es determinen els paràmetres de tots els materials considerats.

Dels paràmetres i classificacions del sòl que es poden determinar, es veu clarament que els millors resultats s'obtenen amb la utilització de les dades bàsiques dels assaigs i que la utilització de les dades de pressió d'aigua només porta a resultats i conclusions no vàlides, com per exemple, la contradicció en la distribució dels materials sobreconsolidats.

Pel que fa als resultats de l'ajust per mínims quadrats, tal i com s'ha vist, han sigut molt dolents, tant pel que fa a l'aplicabilitat del mètode com per als resultats obtinguts.

Els motius són molt variats:

- El model de terreny considerat és complicat el que ha provocat que la quantitat de paràmetres sigui molt gran i amb diverses combinacions per a un mateix assaig al llarg del temps.
- La caracterització dels anomenats llims superficials és molt complicada degut a, per una banda, a la heterogeneïtat d'aquests materials i per altra a les poques dades que se'n tenen en alguns assaigs.
- L'ajust de coeficient de consolidació primària vertical, C_v , és molt complex al estar el paràmetre dintre de l'expressió del grau de consolidació. Segurament, el mètode utilitzat no sigui vàlid al no ser un paràmetre amb variació lineal. Això explicaria el comportament tant rar que presenta el càlcul de C_v .
- S'ha considerat que l'índex de porus, e_0 , es manté constant al llarg de tota la fase de precàrrega, hipòtesi gens correcta perquè un dels principals efectes és la millora del terreny és la reducció de l'índex de porus.
- La situació hidrogeològica de la zona és molt complexa i el model utilitzat potser no la reflexa de manera correcta.
- Cada assaig de caracterització del terreny es relaciona amb un extensòmetre lliscant que permet veure l'evolució de la deformació al llarg del temps. Cal tenir present que la profunditat assolida durant la caracterització i la longitud de l'extensòmetre lliscant són diferents. En general, els extensòmetres són més curts, el que fa que perdem informació en alguns casos.
- També hi ha diferències en la quantitat de mesures de deformació realitzades al llarg del temps per a cada extensòmetre amb el què la quantitat de dades per a fer l'ajust és diferent a cada situació.
- Malgrat la prova de precàrrega tenia dues etapes, una de càrrega de llarga durada i una de descàrrega molt més breu, aquesta segona no s'ha considerat. Això provoca que algunes dades de deformació mesurades durant la descàrrega s'hagin tractat com si fossin de la fase de càrrega.

També cal dir que resulta molt complicat realitzar una comparació entre els resultats obtinguts pels dos mètodes, bàsicament perquè els paràmetres que s'han determinat en cada cas no són els mateixos.

7 Bibliografia.

Acha Daza, S., Acha Izquierdo, D. (2001). "Ajuste de datos experimentales por medio de mínimos cuadrados". Ingenierías, Vol. 4, No. 10, p. 21 – 26.

Alonso, E.E., Gens, A., Lloret, A. (1997) *E.D.A.R. del Llobregat, Informe geotécnico (2ª fase) y análisis de la prueba de precarga*. Informe del Departament d'Enginyeria del Terreny, Minera i Cartogràfica. ETSECCPB – UPC.

Alonso, E.E., Gens, A., Lloret, A. (2000) "Precompression design for Secondary Settlement Reduction". Geotechnique, Vol. 50, No. 6, p. 645 – 656.

Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. Robertson, P.K. (1989). "Shear strength of sand from CPT". Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 179-84.

Chen, B.S-Y, Mayne, P.W. (1994). "Profiling the Overconsolidation Ratio of Clays by Piezocone Tests", Report No. GITCEE/GEO-94-1, National Science Foundation, Georgia Tech, Atlanta, 280 p.

Chang, M.F. (1991). "Interpretation of Overconsolidated Ratio from in situ tests in recent clays deposits in Singapore and Malaysia". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, No 2, p. 210 – 225.

Douglas, B.J., Olsen, R.S. (1981). "Soil classification using electric cone penetrometer", Cone Penetration Testing and Experience, Proceedings of the ASCE National Convention, St. Louis, p. 209-227.

Dunnicliff, J, with the assistance of Gordon E. Green. (1993). "Geotechnical instrumentation for monitoring field performance". Wiley-IEEE. 219-227; 233-235; 237-241; 1067-1072.

Egea Kenz, C. (2004). "Precarga para la mejora del terreno de la 3ª pista del Aeropuerto de Barcelona", Tesina Universitat Politècnica de Catalunya.

Eurogetècnica S.A. (1999). "Seguimiento de la precarga EDAR Baix Llobregat. Avance de resultados". Varis informes, 1999.

ICC- IGC (2006). "Mapa hidrogeològic del tram baix del Llobregat i el seu delta 1:30000". Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Institut Cartogràfic de Catalunya. Institut Geològic de Catalunya.

Jefferies, M.G., Davies, M.P. (1991). "Soil Classification by the Cone Penetration Test: Discussion", Canadian Geotechnical journal, Vol 28, February, pp 173 -176.

Kulhawy, F.H., Mayne, P.H. (1990). "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design", Electric Power Research Institute, EPRI, August, 1990.

Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M. (1997) "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice". Blackie Academic & Professional.

Mayne, P.W. (1991). "Determination of OCR in Clays by Piezocone Tests", Soils & Foundations, Vol. 32 (4), pp. 190-192.

Mayne, P.W., Bachus, R.C., (1988). "Profiling OCR in Clays by Piezocone Soundings", Penetration Testing 1988, Vol. 2 (ISOPT-1), Balkema, Rotterdam, pp. 857-864.

Mayne, Paul W., Holtz, Robert D. (1988) "Profiling Stress History From Piezocone Soundings", Soils and Foundations, Vol. 28, Nº 1, 16-28.

Robertson, P.K. (1990). "Soil classification using the cone penetration test", Canadian Geotechnical Journal.

Bibliografia.

Robertson. P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J. (1986). "Use of Piezometer Cone Data". In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, pp 1263-1280.

Sanglerat, G. (1972). "*The Penetrometers and Soil Exploration*". Elsevier, Amsterdam 448p.

Schmertmann, J. H. (1978). "*Guidelines for cone test, performance, and design*". Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78209, Washington, 145 p.

Senneset, K., Sandven, R., Janbu, N. (1989). "*Evaluation of soil parameters from piezocone test*". In-situ Testing of Soil Properties for Transportation, Transportation Research Record, No. 1235, Washington, D. C., pp. 24 - 37.

Ventayol, A. (2003). "*Caracterización Geotécnica de Sedimentos Deltaicos Mediante Piezoconos. Aplicación al Margen Izquierdo del Delta del Llobregat*". Ingeniería del Terreno. Ingeoter 2. U. D. Proyectos. E.T.S.I. Minas. U.P.M. Madrid.

Annexes.

8 Annexes

8.1 Annex A: llistat del programa.