

Aplicacions del CPTU en Geociències Marines: estudi de casos de la Mediterrània

Sara Lafuerza Colas

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



Universitat de Barcelona
Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines

Aplicacions del CPTU en Geociències Marines: estudi de casos de la Mediterrània

Memòria de Tesi Doctoral realitzada per
Sara Lafuerza

Sota la direcció del
Dr. Miquel Canals i Artigas

Barcelona, Novembre del 2009

La doctoranda,

Sara Lafuerza

El director,

Miquel Canals

CAPÍTOL 4

DADES I METODOLOGIA

Les dades objecte d'estudi provenen d'indrets geogràfics i ambients sedimentaris ben diferenciats: delta del Llobregat, talús terrigen del Golf de Lleó, talús carbonatat del Canal d'Eivissa i ventall submarí del Nil. A la Taula 4.1 hom resumeix els tipus de dades disponibles per a cada cas d'estudi.

Les dades procedents del subsòl del delta del Llobregat consisteixen en un conjunt de testimonis de sediment i mesures de CPT i CPTU (cf. Cap. 5.1). Aquestes dades foren cedides per l'empresa Depurbaix, encarregada dels estudis geotècnics previs a la pre-càrrega de la nova estació EDAR del Llobregat, construïda l'any 2002.

Les dades del Golf de Lleó van ésser adquirides en el marc del projecte europeu PROMESS 1 (*PROfiles across the Mediterranean Sedimentary Systems 1*), dedicat a l'estudi de les seqüències sedimentàries quaternàries d'influència fluvial del Golf de Lleó i la Mar Adriàtica, des de diferents punts de vista. Les dades foren obtingudes en el decurs d'una campanya a bord del vaixell perforador *SRV Bavenit* l'any 2004 (Fig. 4.1), pertanyent a la corporació pública russa *Arctic Marine Engineering Geological Expeditions* (AMIGE) i operat per l'empresa d'exploració marina *Fugro Engineers B.V.* (FEBV) sota contracte amb la Universitat de Barcelona. El port base del *SRV Bavenit* és Murmansk, a l'Àrtic rus, i el projecte PROMESS 1 fou coordinat per l'IFREMER. Concretament, hem emprat dades sedimentològiques i geotècniques de dos testimonis llargs i de dos assajos de CPTU a les estacions anomenades PRGL1 i PRGL2, situades al talús superior i la plataforma del Golf de Lleó, respectivament (cf. Caps. 5.2 i 5.3).

Mercès a la col·laboració establerta amb FEBV en el projecte PROMESS 1, l'any 2005 aquesta empresa va proporcionar dades de CPTU, assajos geotècnics de laboratori i diagrames de pous del ventall submarí del Nil (cf. Cap. 5.5). Aquestes dades formen part d'un estudi d'avaluació de riscos geològics realitzat per FEBV per encàrrec de *British Petroleum* (BP).

Les dades del Canal d'Eivissa s'obtingueren l'any 2007 durant la campanya PRISME coordinada per l'IFREMER, a bord del *N/O L'Atalante*, durant la qual hom obtingué testimonis de sediment i efectuà assajos de CPTU i mesures piezomètriques de l'esllavissament d'Ana situat en aquest canal (cf. Cap. 5.4).

4.1. L'assaig de penetració de con (CPT/ CPTU)

4.1.1. Característiques

L'assaig de penetració *in situ* CPT és un mètode no destructiu de prospecció del subsòl que s'utilitza per a caracteritzar materials tous, com sòls no cimentats, sediments marins, fluvials i lacustres, neu o gel tou. Dit de manera senzilla, l'assaig de CPT consisteix en clavar a una velocitat constant un dispositiu cilíndric d'acer acabat en forma cònica, anomenat penetròmetre (Fig. 4.2a).

En seqüències formades íntegrament per materials tous, com els llims i les argiles, l'execució dels assajos de CPT no sol presentar grans dificultats. En canvi, quan a la seqüència hi ha capes intercalades de materials més grollers i/o cimentats la penetració pot quedar seriosament limitada i l'aparell pot patir danys greus.



Figura 4.1. Vaixell perforador *SRV Bavenit* emprat en les perforacions i assajos del Golf de Lleó i la Mar Adriàtica dins el projecte PROMESS 1. Al fons s'observa l'illa de Stromboli.

	DLI	GdL	VSN	CE
Assajos in situ				
CPT	x			
CPTU	x	x	x	x
Piezòmetre				x
Diagrafies de pou		x	x	
Mostreig de sediment				
Sondeig terrestre de rotació	x			
Perforació marina de rotació		x	x	
Testimoni de gravetat de pistó				x
Anàlisis de laboratori				
Granulometries	x	x	x	x
Contingut en aigua		x	x	x
Límits d'Atterberg		x	x	x
Resistència a la cisalla i angle de fricció interna		x	x	x
Assaig de consolidació unidimensional		x	x	x
Calcimetria				x
Carboni orgànic i matèria orgànica			x	x
Composició elemental				x
Propietats físiques		x		x
Dades geofísiques				
Batimetria de multi feix		x	x	x
Sísmica de reflexió		x	x	x

Taula 4.1. Conjunt de dades utilitzades per a la realització d'aquesta Tesi i la seva procedència. DLI, delta del Llobregat; GdL, Golf de Lleó; VSN, ventall submarí del Nil; CE, Canal d'Eivissa.

El penetròmetre incorpora un seguit de sensors que mesuren la resistència a la punta (q_c), la fricció (f_s) i la pressió de porus (u) exercides al sediment durant la penetració (Fig. 4.2a). Quan el penetròmetre només disposa dels sensors de q_c i f_s l'assaig s'anomena de CPT. Quan el penetròmetre compta amb un sensor de pressió hom

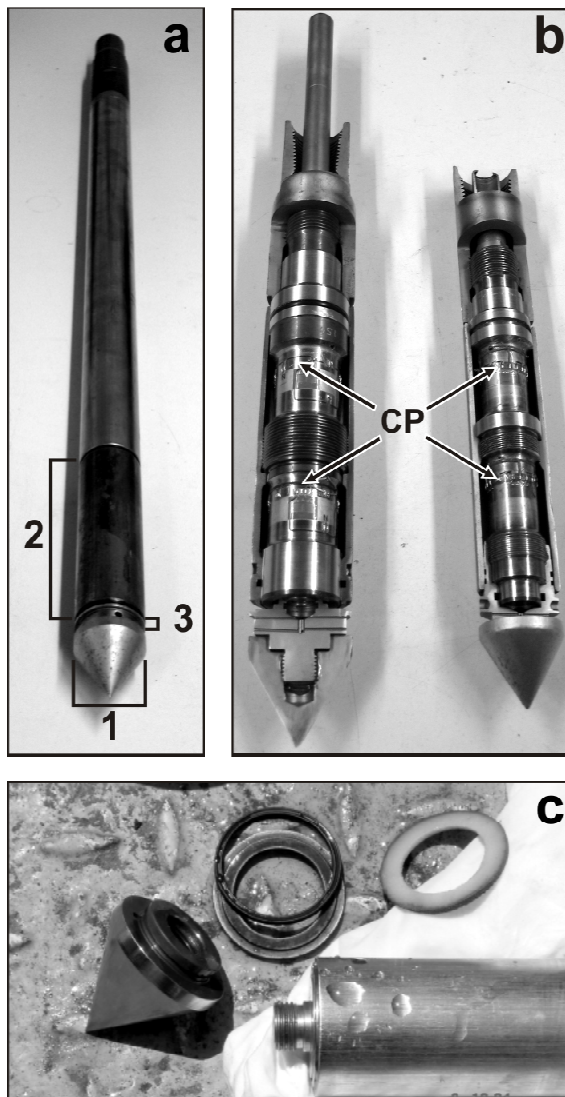


Figura 4.2. a, Penetròmetre estàndard amb els tres sensors principals: la punta de 10 cm² (1), el mànec de fricció (2) de 15 cm de llarg i el sensor de pressió en posició u_2 (3); b, detall de l'interior d'un penetròmetre amb els captadors (CP) que generen el senyal elèctric com a resposta a la resistència, la fricció i la pressió exercides a la punta; c, detall d'un penetròmetre estàndard que mostra la unió de la punta i el mànec de fricció i la posició del sensor de pressió (propilè) en la posició u_2 .

l'anomena piezocon i a l'assaig CPTU. La incorporació del sensor de pressió ha suposat un gran avenç en aquesta mena d'assajos (cf. Cap. 4.1.4).

La resistència en punta q_c , la fricció f_s i la pressió u s'enregistren mercès a captadors interns que emmagatzemen les mesures en forma de senyals elèctrics. Aquests senyals es transformen seguidament a unitats de força per superfície. Depenent del fabricant del dispositiu, els penetròmetres difereixen segons la disposició dels captadors de la resistència i de la fricció. Les dades procedents del Golf de Lleó i del ventall submarí del Nil van ser adquirides amb un penetròmetre de sostracció (de l'anglès *subtraction cone*), el qual mesura la resistència en punta en un captador i el sumatori de la resistència i la fricció en un altre, de manera que la fricció s'obté a partir de la diferència de mesures entre els dos captadors (CP, Fig. 4.2b). El sensor que permet mesurar la pressió consisteix en una anella porosa, habitualment d'acer inoxidable, amb un diàmetre de porus suficientment petit per a permetre l'entrada de volums petits d'aigua que activin els captadors interns de pressió sense que hi hagi entrada de material o obturació dels porus. Aquestes anelles poroses també poden ésser de ceràmica o de materials plàstics, com el polipropilè (Fig. 4.2c). La pressió es pot mesurar en tres posicions del penetròmetre: a l'extrem cònic del dispositiu, u_1 , entre la punta cònica i el cilindre, u_2 , i a l'extrem posterior, u_3 (Fig. 4.3). La posició u_2 és la més utilitzada i acceptada pels estàndards del ISSMFE (1989) (Fig. 4.2a).

Els estàndards del ISSMFE (1989) recomanen l'ús del penetròmetre de punta cònica amb un angle de 60°, una secció de 10 cm² i un cilindre de 150 cm² de superfície (Fig. 4.2a). Malgrat que gran part dels assajos de CPTU es realitzen amb aquest estàndard, també s'utilitzen puntes còniques amb altres mides, com la de 15 cm² en sediments molt grollers (Fig. 4.4a). A banda de la punta estàndard (Fig. 4.4b), en investigacions geotècniques de

poca penetració (fins a 5 metres en el subsòl) és molt comú la utilització de penetròmetres amb puntes de 1-5 cm² (Fig. 4.4c), anomenats mini-piezocons (Lunne et al., 1997). Altres tipus de puntes molt útils són la sísmica, que permet mesurar la propagació de les ones P (Fig. 4.4e) o les puntes esfèriques per sediments molt tous (Fig. 4.4e). Bona part dels penetròmetres actuals incorporen sensors interns que mesuren la desviació de l'aparell respecte la vertical. Això és molt pràctic, sobretot en assaigs de penetració profunda de sòls estratificats en els que el penetròmetre pot arribar a inclinar-se fins a 45° (Lunne et al., 1997). La major part dels penetròmetres utilitzats a profunditats de prospecció superiors als 15 m incorporen aquest sensor. Coneixent la inclinació del sistema, es pot corregir la profunditat relativa mesurada i obtenir dades a les profunditats reals.

Si durant l'execució de l'assaig es realitzen aturades, l'excés de pressió de porus generada al voltant del penetròmetre tendeix a dissipar-se. La mesura de la velocitat de dissipació de la pressió s'anomena assaig de dissipació. Aquestes aturades es poden realitzar a qualsevol fondària. Idealment, l'assaig de dissipació no finalitza fins que l'excés de pressió es dissipa totalment però, a la pràctica, la manca de temps durant l'execució de l'assaig, habitual en exploracions marines, no sempre ho permet. El temps de dissipació depèn directament de la permeabilitat dels materials a investigar, essent més gran com més petita sigui la permeabilitat. En ambients marins profunds dominats per sediment molt fi sovint no s'aconsegueix realitzar assajos de dissipació total donat que l'elevat lapse de temps necessari per a una dissipació total comporta despeses massa grans. En els casos que només es disposa de dissipacions parcials, la pressió d'equilibri s'extrapola (veure mètodes concrets al Cap. 5.4).

Les mesures de resistència, fricció i pressió es representen en perfils respecte la profunditat de penetració (Fig. 4.5).

4.1.2. Tècniques d'execució

L'execució pràctica de l'assaig de CPT/CPTU varia segons es realitzi a terra o a mar. Als assajos terrestres sovint s'instal·la l'equip en camions equipats amb sistemes d'empenta hidràulics des dels quals hom va clavant successivament varetes d'acer de 1, 1,5 o 3 m de llarg. D'acord amb els estàndards del ISSMFE (ASTMD5778-95, 2000), la penetració cal fer-la a una velocitat constant de 2 cm s^{-1} ($\pm 5 \text{ mm s}^{-1}$), obtenint-se així perfils continus amb 1 dada per cada cm penetrat.

Hi ha dos tipus de CPT/CPTU que s'utilitzen en ambients marins:

- (i) els assajos poc profunds, fins a profunditats d'aigua de 30-40 m i
- (ii) els assajos profunds, a profunditats d'aigua de més de 40 m.

El procediment d'execució dels assajos poc profunds consisteix en la instal·lació de plataformes suportades per pilones (Fig. 4.6a) o ancorades al fons del mar, damunt les quals hom hi situa els camions equipats amb el sistema d'empenta (Fig. 4.6b). Pel demés, l'assaig es fa exactament igual que a terra.

En canvi, en aigües profundes l'execució de l'assaig difereix substancialment ja que calen vaixells oceanogràfics o de prospecció (*survey vessel*) amb posicionament dinàmic, o vaixells perforadors dotats de posicionament dinàmic i de mecanisme de compensació de l'onatge, com el *SRV Bavenit* (Fig. 4.1). Al seu torn, la penetració en el subsòl marí pot ésser superficial o profunda (Lunne et al., 1997).

Penetració superficial (*seabed mode*)

Consisteix en clavar el penetròmetre directament en el subsòl des del punt del fons marí on hom hi ha col·locat, des del vaixell, una estructura des d'on s'aplica l'empenta necessària per a clavar el penetròmetre a partir d'un engranatge format per diversos rodetes. El penetròmetre es clava mitjançant

una vareta enrotllada d'acer flexible que es va posant tesa a mesura que es va desenrotllant. Aquest dispositiu permet realitzar mesures contínues en funció de la longitud total de la vareta, la qual sol oscil·lar entre 30 i 50 m (Figs. 4.7a i b).

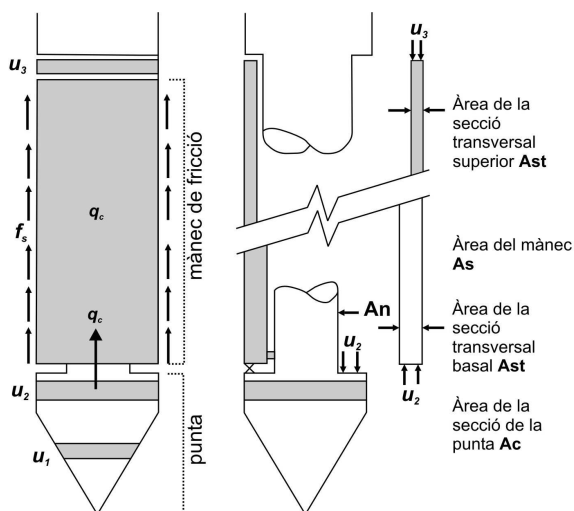


Figura 4.3. Esquema de les tres posicions del filtre de pressió: u_1 a la punta, u_2 entre la punta i el mànec i u_3 darrera del mànec. Les fletxes representen els efectes de la resistència del sòl a la inserció.

Penetració profunda (*down-the-hole mode*)

La seva execució requereix l'ús de vaixells amb torre de perforació (Fig. 4.1). Aquest assaig es realitza inserint el penetròmetre a la base del tub de perforació (Fig. 4.8a), la posició del qual es controla mercès al posicionament dinàmic del vaixell i a una estructura posada en el fons (*seabed frame*) des d'una obertura (*moonpool*) situada a la coberta del vaixell sota l'eix de la torre de perforació (Fig. 4.8b). L'assaig consisteix en realitzar sèries successives de mesures la longitud de les quals ve determinada per la llargada de les varetes (Fig. 4.8c), generalment 3 m. El penetròmetre (Fig. 4.8d) es clava en el subsòl a partir de l'extrem inferior del tub de perforació (Fig. 4.8a), de manera que per cada 3 m perforats hom va obtenint mesures dels 3 m de sediment que hi ha immediatament a sota. A la fi de cada seqüència de perforació (si de cas, amb obtenció de testimoni), hom recupera el piezocon i es reinicia la seqüència

començant per la perforació dels 3 metres següents. A diferència dels sistemes terrestres, les varetes dels quals són perforades per a que hi passi un cable umbilical que proporciona les dades de mesura en temps real (Fig. 4.6b), els assajos de penetració profunda sovint utilitzen mòduls de memòria on s'emmagatzemen les dades fins que, posteriorment, són descarregades.

4.1.3. Interpretació

La interpretació de dades de CPT/CPTU requereix:

- (i) definir els factors que afecten les dades i realitzar les correccions necessàries,
- (ii) classificar els sòls (identificació del tipus de material),
- (iii) definir l'estratigrafia geotècnica, i
- (iv) estimar els paràmetres geotècnics.

Així doncs, abans d'utilitzar les dades cal dur a terme un seguit de correccions per a identificar acuradament l'estratigrafia geotècnica i els paràmetres geotècnics derivats.

Per a interpretar correctament les dades cal disposar de mostres del sediment penetrat o efectuar altres assajos que proporcionin

informació addicional dels materials objecte d'estudi. Cal assenyalar, però, que els CPTUs permeten identificar el perfil estratigràfic amb una resolució que no sempre s'aconsegueix mitjançant sondatges o testimonis de sediment. D'altra banda, el gran nombre de propietats geotècniques que es deriven de cada assaig suposa un estalvi extraordinari d'assajos de laboratori i dels costos inherents.

Correccions

Un dels efectes més importants a tenir en compte a l'hora d'interpretar les mesures directes de CPTU és la disminució de la resistència en punta i les variacions de la fricció provocades per l'excés de pressió generat durant l'assaig. Aquest efecte es coneix com "efecte de les àrees desiguals". Va ser detectat per primera vegada en assajos realitzats en medis marins en els que la resistència en punta mesurada a l'aigua no era igual a la pressió hidrostàtica (Lunne et al., 1997). Aquest fenomen es deu a que l'aigua que es filtra pel sensor de pressió exerceix una esforç contrari a la resistència sobre la punta del penetròmetre (Fig. 4.2).

Per a obtenir la resistència total es calcula aquesta pressió contrària, que depèn de la superfície de la punta cònica, A_n (Fig. 4.3).

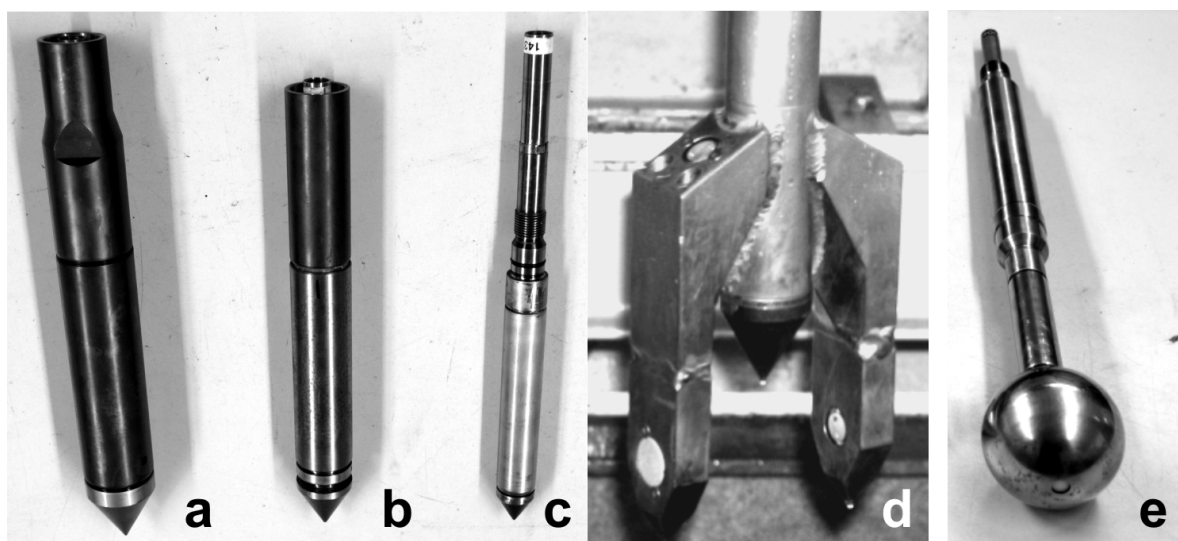


Figura 4.4. Diferents puntes de penetròmetre. a, 15 cm²; b, 10 cm²; c, 5cm²; d, con sísmic; e, punta esfèrica utilitzada en sediments molt tous (models de puntes utilitzades per Fugro).

Tenint en compte que la superfície total és A_c , la pressió contrària es calcula a partir de:

$$u_2 \cdot (1 - A_n/A_c); A_n/A_c = a \quad [1]$$

De manera que la resistència corregida q_t és:

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a) \quad [2]$$

L'excés de pressió també afecta les mesures de la fricció. Per a corregir-la cal considerar que aquesta pressió no és igual a tots dos extrems del cilindre, essent més gran a l'extrem superior degut a la variació de gruix interna que el caracteritza (Fig. 4.3). Les pressions contràries en ambdós extrems respecte la superfície total del cilindre A_s provoquen un increment de la mesura de fricció a l'extrem superior i una disminució a l'extrem inferior:

$$u_2 \cdot (1 - A_{sb}/A_s), \text{ a l'extrem inferior} \quad [3]$$

$$u_3(1 + A_{st}/A_s), \text{ a l'extrem superior} \quad [4]$$

Per tant, la fricció corregida f_t és:

$$f_t = f_s - [(u_2 \cdot A_{sb} - u_3 \cdot A_{st})/A_s] \quad [5]$$

En el cas d'assajos de CPT que només proporcionen mesures de q_c i f_s aquestes correccions no es realitzen.

Paràmetres normalitzats

Un altre aspecte a tenir en compte en relació amb les mesures de q_c , f_s i u és l'increment del seu valor amb la profunditat de penetració tot i seguint l'augment lineal de la pressió litostàtica o esforç vertical σ_v . Això fa que en un mateix punt sòls idèntics puguin presentar valors diferents, provocant errors d'interpretació i de classificació del sòl. Per a solucionar aquest inconvenient, la resistència, la fricció i la pressió es normalitzen amb l'esforç vertical de la següent manera:

$$Q_t = (q_t - \sigma_v) / \sigma'_v \quad [8]$$

$$FR = f_s / (q_t - \sigma_v) \quad [9]$$

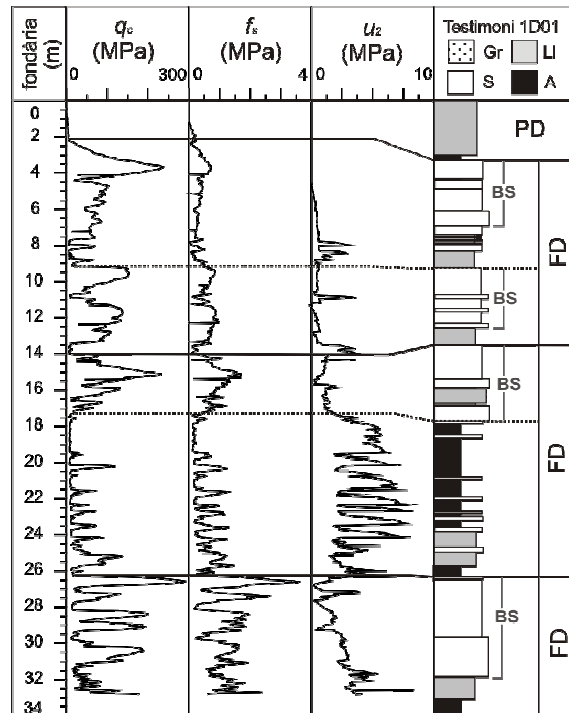


Figura 4.5. Correlació entre un perfil de CPTU i un sondeig de la plana deltaica del Llobregat (1D01) on es mostra que els materials grollers com les sorres (S) i les graves (Gr) solen presentar resistències a la penetració molt elevades respecte l'excés de pressió, mentre en materials fins, com les argiles (A) i llims (LI), la resistència i la fricció són més baixes. Tipus de dipòsits interpretats al 1D01 : PD, prodeltaics; FD, front deltaic; BS, barres de sorra.

$$Bq = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_v) \quad [10]$$

on u_0 és la pressió de porus in situ o pressió d'equilibri, σ_v l'esforç vertical, igual a $(z \cdot \gamma)$, i σ'_v l'esforç vertical efectiu, $\sigma'_v = [(z \cdot \gamma') - (z \cdot \gamma_w)]$, on z és la profunditat, γ el pes específic total i γ_w el pes específic de l'aigua.

La mesura de l'excés de pressió també varia segons la localització del sensor, motiu pel qual s'aconsella utilitzar penetròmetres amb el sensor a la posició estàndard u_2 (Fig. 4.2a) (Lunne et al., 1997).

4.1.4. Classificació dels sòls

El tipus de sòl s'interpreta a partir de relacions entre diferents paràmetres, directes, corregits o normalitzats, mitjançant diagrames de classificació. Els mètodes de

classificació es basen en el comportament mecànic dels materials els quals sovint estan lligats amb el tipus de material.

La classificació del sòl a partir de dades de CPT es fa a partir de mesures directes (q_c i f_s), mentre que en el cas del CPTU s'usen paràmetres corregits i normalitzats. De tota manera, en sediments sorrenco, en que la resistència és molt elevada respecte l'excés de pressió, hom ha observat que la classificació basada només en q_c i f_s (Robertson et al., 1986) és molt semblant a la que s'obté a partir de paràmetres corregits i, per tant, es considera vàlida (cf. Cap. 5.1). En canvi, en materials fins com les argiles, en que es generen excessos de pressió elevats durant la penetració, cal emprar necessàriament paràmetres normalitzats per a classificar els sòls (Lunne et al., 1997).

Els dos mètodes de classificació més utilitzats associen parelles de valors Q_t -FR i Q_t - B_q a 12 tipus de sòls diferents (Robertson, 1990) (Fig. 4.9) i parelles de valors de a 9 tipus de sòls (Ramsey, 2002) (Fig. 4.10). La segona classificació té avantatges respecte la primera ja que, a més, permet fer una primera avaluació de l'estat de consolidació i la sensibilitat del sòl (Fig. 4.10).

Generalment, els sòls representats a les zones 6 i 7 de la classificació de Robertson (1990) corresponen a sediments en que la penetració és drenada, és a dir, a sòls relativament porosos com sorres llimoses, sorres i graves, mentre que els representats a les zones 1, 2, 3 i 4 corresponen a penetracions no drenades, com les que es donen en argiles i llims argilosos. La resta de zones s'associen a sediments en que la penetració és parcialment drenada, com les sorres riques en llims i les argiles sorrenques.

Les classificacions de sòls a partir de dades de CPT/CPTU s'han establert després de comparar les relacions entre els paràmetres rellevants, mesurats en un gran nombre de sòls diferents arreu del món (Lunne et al., 1997), gran part dels quals terrestres. Ramsey (2002) proposà un sistema de classificació basat en els mateixos paràmetres normalitzats però a partir de dades empíriques obtingudes en sediments marins no carbonatats d'edat quaternària de la Mar del Nord, on els mètodes de classificació de Robertson (1990) resultaren inapropiats (Fig. 4.10). Per aquest motiu, en assajos de piezocon en ambients marins hom acostuma a comparar els resultats de les dues classificacions, és a dir, de Robertson (1990) i Ramsey (2002)

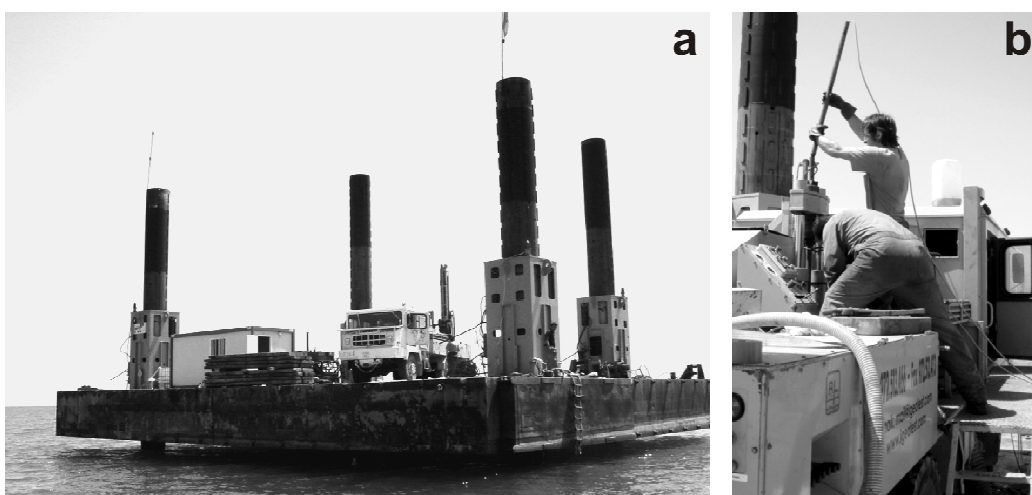


Figura 4.6. a, Camió per a l'execució d'assajos de CPTU a terra instal·lat damunt una plataforma amb potes recolzades en el fons marí, adequat per a treballar a profunditats d'aigua petites (unes poques desenes de metres); b, detall de l'execució de CPTUs mitjançant un camió instal·lat en una plataforma. Les fotografies foren obtingudes durant la realització de CPTUs al prodelta del Llobregat en el marc dels estudis previs a l'ampliació del port de Barcelona.

La velocitat de dissipació permet obtenir classificacions més acurades. Una velocitat de dissipació molt lenta en un nivell classificat inicialment com a sorres llimoses pot servir per a adonar-se de que realment es tracta de llims. I si la velocitat de dissipació és particularment ràpida, aleshores podem dir que les sorres llimoses inicials són en realitat sorres (Lunne et al., 1997).

4.1.5. Perfil estratigràfic geotècnic

L'altíssima resolució dels perfils de CPTU (recordem-ho, 1 mesura per cm) permet identificar variacions verticals que es poden comparar directament amb seqüències granulomètriques (Moran et al., 1989). Hom considera que el perfil del subsòl (marí, en el nostre cas) que s'obté a partir de l'assaig de CPTU aporta informació fiable de l'estratigrafia geotècnica. Aquest concepte fa referència a la distribució i la successió vertical de les propietats mecàniques en seqüències estratificades i a la seva interpretació en termes d'història geològica i geotècnica (Bryant et al., 2000). La identificació de l'estratigrafia geotècnica inclou:

- (i) la identificació del perfil estratigràfic, és a dir, la identificació en sentit vertical de les successions de capes i les seves variacions, i
- (ii) la caracterització de les capes en termes de tipus de sòl i propietats mecàniques.

Un dels aspectes a destacar en relació amb el CPTU és el límit de detecció de nivells sedimentaris primis. La transició entre capes primes no sempre és enregistrada per un canvi en la resistència. De fet, estudis recents mostren que la resistència mesurada en capes primes de sorres denses intercalades entre argiles toves és inferior a la real (Ahmadi i Robertson, 2005). Al Capítol 5.2 hom mostra un exemple d'avaluació del límit de detecció del gruix de capes.

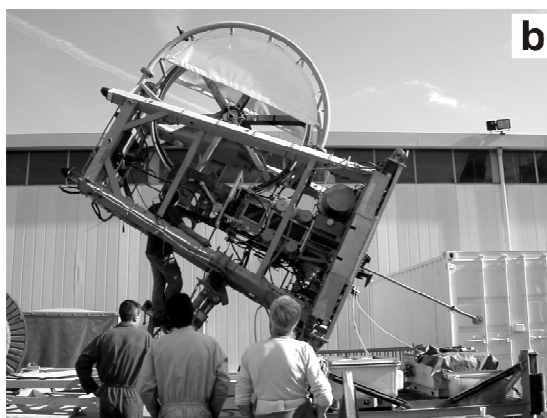


Figura 4.7. a, Exemple de tècnica d'execució de CPTU poc profunda (*seabed mode*) amb el model PENFELD, de 30 m de penetració, dissenyat i operat per l'IFREMER; b, base de l'estructura del PENFELD on es pot observar el penetròmetre.

4.1.6. Paràmetres geotècnics derivats

Pes específic

Tot i que de forma molt aproximada, si no es disposa de mostres de sediment hom pot estimar el pes específic (γ) a partir de la classificació del tipus de sòl de Robertson et al. (1990) obtinguda mitjançant les dades de CPTU (Taula 4.2). Els valors de la Taula 4.2 foren obtinguts a partir de mesures de CPTU en diversos tipus de sòls dels quals hom disposava de mesures de γ (Lunne et al., 1997).

Resistència a la cisalla no drenada (S_u)

La resistència a la cisalla (τ) és l'esforç màxim d'un material quan es produeix la ruptura (Craig, 2005). Aquesta resistència s'expressa com el sumatori de dos comportaments: la resistència deguda a la fricció interna ($\sigma \cdot \tan \phi$) i la resistència deguda a la cohesió (c), que seguint el criteri de ruptura de Mohr-Coulomb s'expressa:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad [11]$$

on σ és la tensió normal que actua en el pla de ruptura i ϕ és l'angle de fricció interna. La cohesió i l'angle de fricció interna es consideren mesures de la resistència a la cisalla, i com majors siguin els seus valors més gran serà aquesta (Mitchell i Soga, 2005).

Els materials que no presenten cohesió (materials friccional), com les sorres, estan caracteritzats per una resistència a la cisalla suportada només per la fricció ($c = 0$), de manera que l'equació 11 es converteix en $\tau = \sigma \cdot \tan \phi$. Els sòls granulars solen expulsar (drenar) el fluid intersticial quan pateixen ruptura. En canvi, els sòls cohesius ($\phi = 0$) com les argiles, quan estan afectats per una càrrega responen generant excés de pressió ja que la seva baixa permeabilitat els impedeix el drenatge. La baixa permeabilitat dels materials fins provoca que durant els assajos de CPTU, la resistència exercida pel sediment sigui una resistència no drenada. A partir de les mesures de CPTU en aquestes condicions es pot estimar la resistència a la cisalla no drenada S_u .

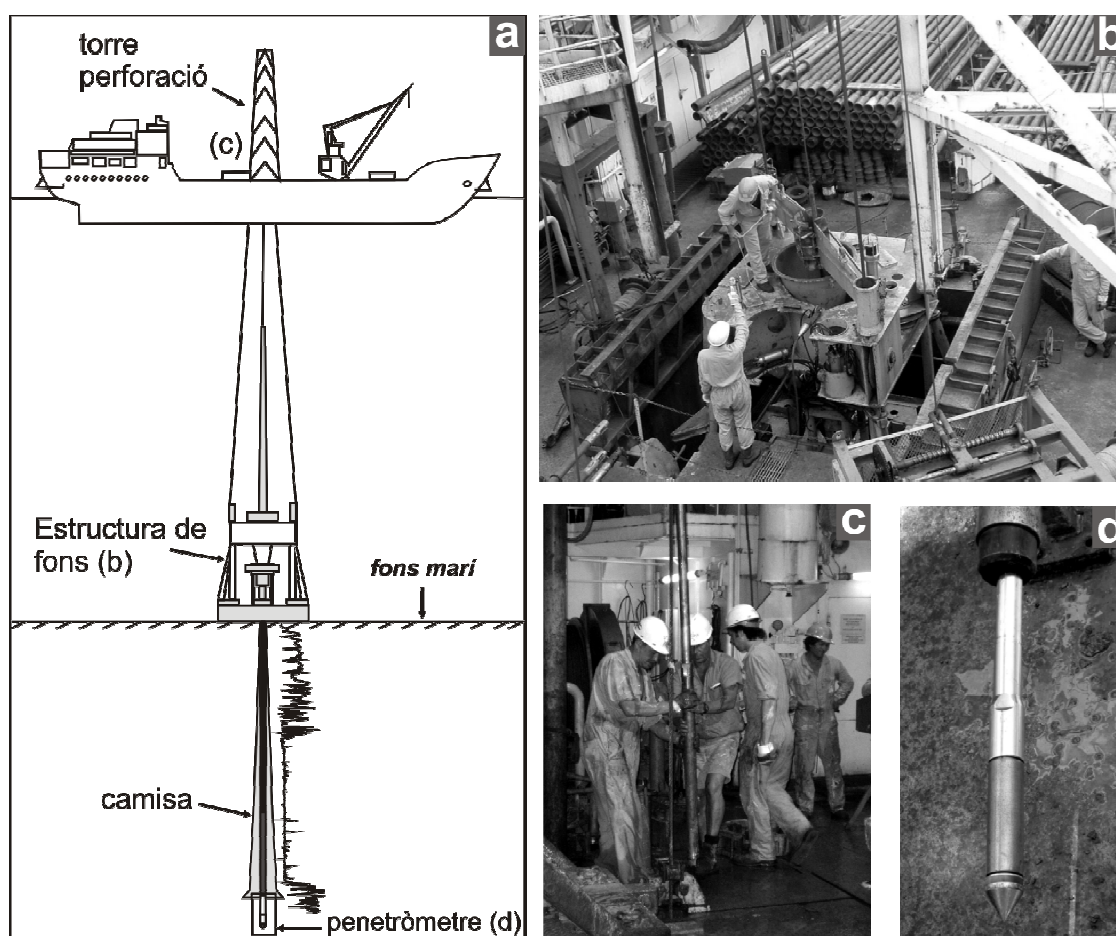


Figura 4.8. a, Tècnica d'execució de CPTU profunda (*down-the-hole mode*); b, estructura de fons (*seabed frame*); c, treballs en la coberta de perforació durant un assaig de CPTU (campanya PROMESS 1, a bord del *SRV Bavenit*); d, penetròmetre estàndard utilitzat a la campanya PROMESS 1. La situació relativa de les fotografies b, c i d en el vaixell s'indica a la Figura a.

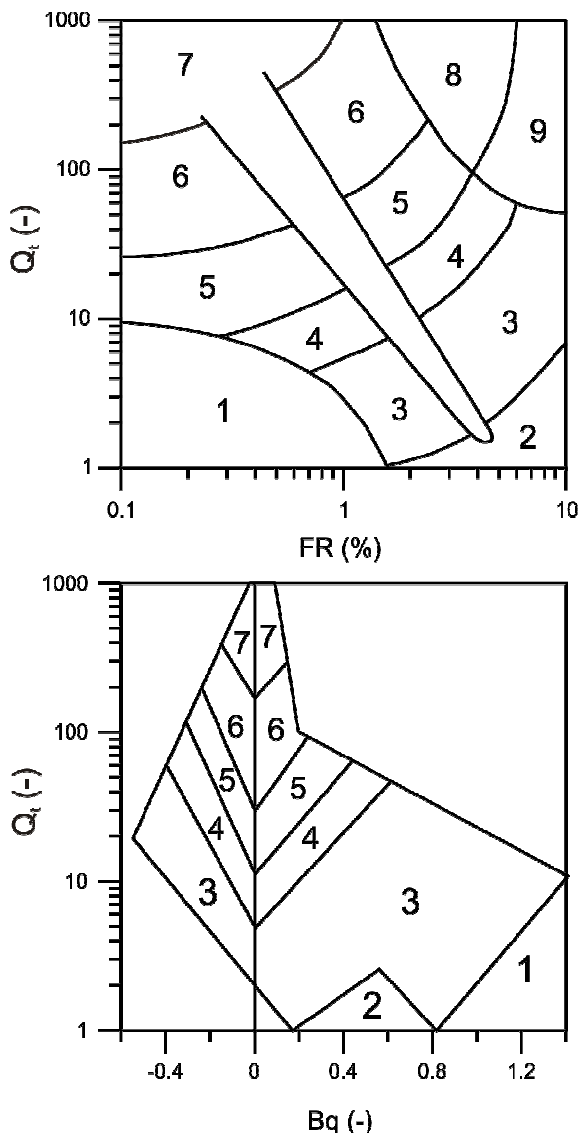


Figura 4.9. a, Diagrames de classificació dels sòls basada en els paràmetres Q_t , FR i B_q segons Robertson (1990). 1, Sòls fins sensitius; 2, sòls amb elevat contingut en matèria orgànica; 3, argiles; 4, barreja de llims argilosos i argiles llimoses; 5, barreja de sorres, sorres llimoses i llims sorrencs; 6, sorres ben classificades; 7, sorres grolleres i sorres mitges; 8, argiles molt compactades i sorres argiloses; 9, sòls fins molt durs.

Hi ha dos gran aproximacions a seguir per a calcular la S_u : les teòriques i les basades en correlacions empíriques. Els mètodes teòrics no sempre s'ajusten a la realitat, de manera que generalment hom utilitza les correlacions empíriques basades en dades reals (Lunne et al., 1997). Dels tres tipus de correlacions empíriques (Taula 4.3), hom recomana utilitzar la basada en q_t en àrees d'estudi de les que no es tingui informació prèvia sobre

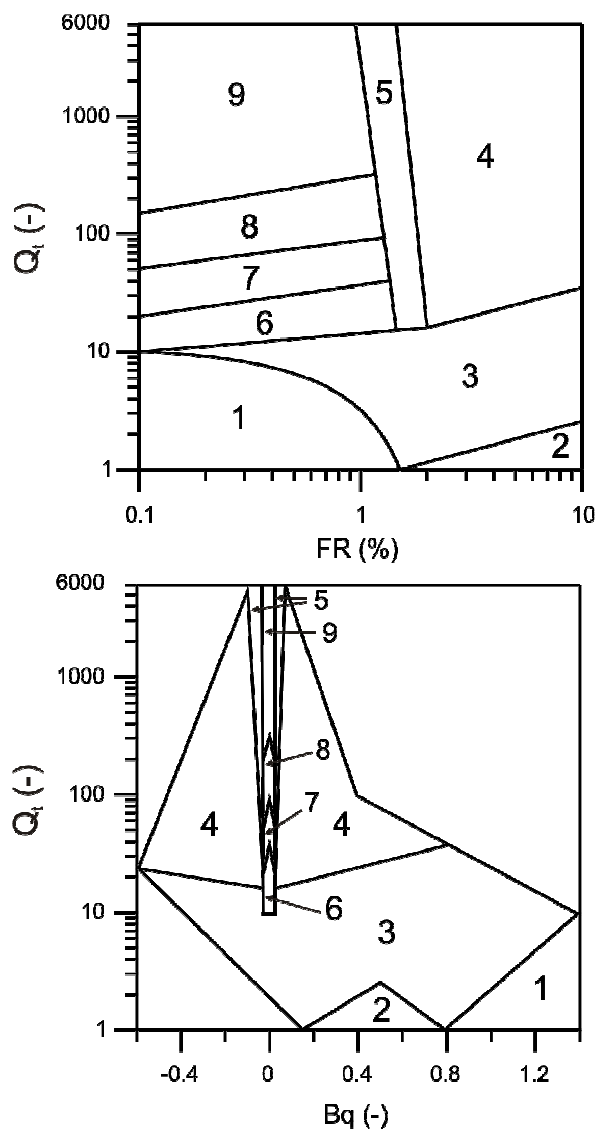


Figura 4.10. Diagrames de classificació de sòls basada en els paràmetres Q_t , FR i B_q segons Ramsey (2002). 1, Argiles molt sensitives; 2, sòls amb elevat contingut en matèria orgànica; 3, argiles ($S_u/\sigma'_{v0} < 1$); 4, argiles ($S_u/\sigma'_{v0} > 1$); 5, sorres argiloses; 6, llims argilosos i llims sorrencs; 7, llims sorrencs; 8, sorres llimoses; 9, sorres ben classificades. S_u , resistència a la cisalla no drenada; σ'_{v0} , esforç vertical efectiu.

les propietats del sòl, emprant valors del paràmetre N_{kt} entre 15 i 20. En materials normalment consolidats o lleugerament sobreconsolidats N_{kt} pot arribar a valer 10, mentre que en argiles molt dures fissurades pot valer 30. En argiles molt toves es recomana estimar S_u a partir de Δu , prenent $N_{\Delta u}$ entre 7 i 10. Lunne et al. (1997) també recomanen l'ús de valors de $N_{\Delta u}$ propers a 10 per a estimacions més acurades.

Sensitivitat

$$S_t = S_{u_i} / S_{u_r} \quad [12]$$

Normalment la S_{u_i} es determina mitjançant aparells de laboratori com el molinet o el con de caiguda lliure (cf. Cap. 4.4.3). Però gràcies a la relació establerta entre els paràmetres derivats de les mesures de CPTU i la S_{u_r} , la sensitivitat també es pot estimar a partir del FR d'acord amb l'expressió

$$S_t = N_\sigma / FR \quad [13]$$

on N_σ és una constant que oscil·la entre 5 i 10, podent-se utilitzar el valor promig 7,5 (Lunne et al., 1997).

OCR i esforç de preconsolidació

La consolidació és el procés de reducció gradual del volum d'un sòl saturat degut al drenatge parcial del seu fluid intersticial. Si no hi ha drenatge del fluid intersticial, la pressió augmenta en els primers estadis i es dissipa al llarg del temps fins que s'assoleix l'assentament o consolidació. L'assentament al llarg del temps depèn de la permeabilitat del material, el gruix de material que s'està drenant i la seva compressibilitat.

La compressibilitat depèn de l'ordenació de les partícules sòlides que formen el sòl. En un sòl completament saturat (la seva porositat està reblerta per aigua), la reducció del volum inicial durant la consolidació només pot tenir lloc si el fluid és expulsat de l'estructura donat que l'aigua és incompressible. En canvi, si el sòl està parcialment saturat, pot existir una certa reducció del volum de la porositat reblerta per aire. Hom considera, generalment, que els sediments marins són sòls fins cohesius completament saturats.

Les càrregues normals (sentit vertical) que actuen en un sòl són suportades per les forces desenvolupades en el contacte intraparticular que configuren el seu esquelet i el fluid intersticial. En el cas de sòls saturats, la transmissió de la càrrega s'explica a través del

principi de l'esforç de cisalla (Terzaghi et al., 1996). Aquest principi relaciona els tres esforços principals que intervenen en la consolidació:

(i) l'esforç vertical total σ_v , que és la força per unitat de superfície transmesa en sentit vertical,

(ii) la pressió intersticial u , que és la pressió de l'aigua (o altre fluid) que rebleix la porositat del sòl i que exerceix un esforç en sentit contrari a σ_v i

(iii) l'esforç vertical efectiu σ'_v , que és l'esforç transmès a través de l'esquelet.

Aquests tres esforços es relacionen de la següent manera:

$$\sigma_v = \sigma'_v + u \quad [14]$$

En funció dels processos geològics que tenen lloc durant la consolidació es defineixen tres possibles estats: (i) normalment consolidat, (ii) sobreconsolidat o (iii) sotaconsolidat. La ràtio de sobreconsolidació, OCR (*Over Consolidation Ratio*) es defineix com l'esforç màxim de consolidació que va actuar en el passat, anomenat esforç de preconsolidació (σ'_p), respecte l'esforç vertical efectiu:

$$OCR = \sigma'_p / \sigma'_v \quad [15]$$

Un material normalment consolidat té OCR = 1; quan està sobreconsolidat l'OCR > 1 i quan està sotaconsolidat, OCR < 1. Hom considera que un material està sobreconsolidat quan ha patit deformació o erosió, és a dir, que en el passat ha sofert una càrrega superior a la que actualment suporta, mentre que un material sotaconsolidat és aquell que no arriba a consolidar per un impediment de la dissipació de l'excés de pressió, la qual cosa es pot entendre com a un material sobrepressionat.

Hi ha tres grups de mètodes per a estimar la σ'_p a partir de dades de CPTU:

(i) basats en les mesures de resistència,

(ii) basats en l'excés de pressió,

(iii) basats en combinacions de la resistència i la pressió.

Demers i Leroueil (2002) afirmen que el mètode basat en la resistència i el paràmetre $N_{\sigma t}$ és el que permet obtenir una aproximació més acurada, per la qual cosa l'aproximació que s'ha utilitzat és:

$$\sigma'_p = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{\sigma t} \quad [16]$$

on $3.3 < N_{\sigma t} < 3.4$ (extrets de Demers i Leroueil, 2002, i Mayne, 2007).

4.2. Altres assajos i mesures in situ

4.2.1. Piezòmetre

Aquest aparell mesura la pressió intersticial, que és una pressió d'equilibri. El piezòmetre utilitzat a l'esllavissament d'Ana està format per una llança de 60 mm de diàmetre (Fig. 4.11), capaç de penetrar diferents tipus de sediment fins profunditats d'aigua de 6000 m. La llargada de la llança depèn de la duresa del sediment. En sediments tous hom arriba a utilitzar llances de fins a 12 m. La mesura de la pressió s'efectua respecte la pressió hidrostàtica en un màxim de 5 sensors amb transductors de pressió diferencial. La resolució dels transductors és de ± 0.2 kPa (Sultan et al., 2007).

Amb aquest aparell hom pot efectuar dos tipus de mesures: (i) a llarg termini, on la pressió d'equilibri pot ésser assolida després de dies o mesos si l'objectiu és monitorar la pressió durant un lapse de temps llarg; (ii) a curt termini, en que la pressió d'equilibri s'avalua representant el registre de pressió respecte el temps (cf. Cap. 5.4).

4.2.2. Diagrafies de pous

Són el resultat de diverses mesures efectuades a l'interior d'una perforació amb sensors específics cablejats. Per a la

Classificació	Pes específic (KN/m ³)
1	17.5
2	12.5
3	17.5
4	18
5	18
6	18
7	18.5
8	19
9	19.5
10	20
11	20.5
12	19

Taula 4.2. Valors del pes específic (γ) corresponents a la classificació de sòls basada en q_t i FR de Robertson et al. (1986). 1, Sòls fins sensitius; 2, sòls amb elevat contingut en matèria orgànica; 3, argiles; 4, argiles a argiles llimoses; 5, argiles llimoses a llims argilosos; 6, llims argilosos a llims sorrencs; 7, llims sorrencs a sorres llimoses; 8, sorres llimoses a sorres; 9, sorres; 10, sorres a sorres grolleres; 11, sòls fins molt durs; 12, sorres argiloses a sorres.

realització de diagrafies en bones condicions cal que el pou de sondeig sigui estable. Habitualment es mesura la resistivitat, la inclinació, la deformació de la perforació amb el *calliper* i el *dipmeter* (mesures del diàmetre de la perforació), la propagació de les ones P, la densitat a partir de l'atenuació de la radiació gamma, i la porositat a partir de l'absorció de neutrons, entre moltes altres.

En el Golf de Lleó, l'execució d'aquests assajos es realitzà per sota dels primers 60 m degut a la inestabilitat del pou PRGL1-4 (cf. Cap. 5.2) per sobre d'aquesta profunditat. Les mesures es realitzaren un cop s'enretirà l'entubat per sota de 60 m. El primer sensor utilitzat fou el *dipmeter*. Per sota de 60 m, les mesures constants del *dipmeter* indicaren que

la perforació era estable. Posteriorment es van realitzar mesures de la propagació de les ones P de 216 m a -61,6 m sota el fons, de l'atenuació de la radiació gamma, de l'absorció de neutrons de 212 m a -64,9 m i la susceptibilitat magnètica de 215,5 m a 65 m. Una major estabilitat en el pou adjacent PRGL1-5 (cf. Cap. 5.2) va permetre obtenir registre de la propagació de les ones P de 62,5 m a 33 m.

L'execució al pou BH1 al ventall submarí del Nil (cf. Cap. 5.5) es realitzà a dins de l'entubat de perforació, degut a la inestabilitat observada un cop s'enretirà l'entubat per realitzar les mesures amb el *calliper*. S'obtingueren exitosament diagrames contínues al llarg de 184 m de l'atenuació de la radiació gamma i l'absorció de neutrons.

4.3. Mostreig de sediment

Les mostres de sediment analitzades en aquest treball s'han obtingut amb diferents tipus de mostrejadors. Els testimonis de sediment del delta del Llobregat foren recuperats amb un sistema de perforació per rotació amb extracció contínua de testimoni a càrrec de l'empresa IGEO TEST S.L. Aquests dispositius foren executats des de camions amb un sistema d'inserció hidràulica de 200 kN, un sistema de reacció de 17 tonelles amb nivelladors hidràulics i una velocitat màxima de rotació de 700 rpm. Aquest tipus de camió està equipat per poder realitzar altres assajos, com el de CPTU (Fig. 4.12a).

Els testimonis del Golf de Lleó i del ventall submarí del Nil es van obtenir mitjançant el vaixell perforador *SRV Bavenit* (Fig. 4.1). Aquest vaixell està equipat amb una torre de perforació de 42 m d'alçada i el sistema de perforació per rotació *Christensen Marine Wireline Core Barrel* (www.fugro.com). El dispositiu de perforació utilitzat al *SRV Bavenit* consisteix en l'estructura de fons Fugro BHA (*bottom hole assembly*), el coll de la perforació i tres trams d'entubat de 5 polzades de diàmetre (*drillstring*): entubat API

Expressió empírica	Observacions	
Basat en la resistència	$S_u = (q_c - \sigma_{v0}) / N_k$	N_k és el factor del con empíric. El valor de N_k en argiles no fisurades sobreconsolidades és aprox. 17 i en argiles marines normalment consolidades entre 11 i 19, amb un valor mig de 15. S'utilitza quan no es disposa
	$S_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt}$	N_{kt} oscil·la entre 8 i 16 quan l'índex de plasticitat (I_p) és $3\% < I_p < 50\%$. Es prenen valors entre 10 i 15.
Basat en l'excés de pressió	$S_u = \Delta u / N_{\Delta u}$	u_0 és la pressió hidrostàtica en equilibri. Aquesta expressió no es pot utilitzar en argiles molt sobreconsolidades perquè el B_q pot arribar a ser molt baix o fins hi tot negatiu.
	$u = u_2 - u_0$	$N_{\Delta u}$ varia entre 4 i 10 en argiles marines (Lunne et al., 1997)

Taula 4.3. Expressions empíriques per estimar la resistència a la cisalla no drenada S_u a partir de la resistència (q_c o q_t) i l'excés de pressió (u_2).

d'alumini i ferro, un tram central d'entubat d'alumini, i entubat API de ferro a la part superior. Els fluids de perforació utilitzats foren aigua pels primers 100 m i fang de bentonita per a profunditats superiors. Els mostrejadors utilitzats foren el WIP, el PISTON i el Fugro CORER (www.fugro.com). Els dos primers consisteixen en un cilindre d'acer amb una camisa de PVC interna que permet recuperar un metre de mostra inalterada de 76 mm de diàmetre aplicant una empenta de 80 kN. A diferència del WIP, el PISTON té incorporat un sistema de pistó

que permet tenir un millor control de la recuperació. El cilindre està connectat amb la torre de perforació a través d'un cable umbilical que passa pel centre de l'entubat de la perforació. En canvi, el Fugro CORER és un dispositiu de caiguda lliure que no està unit al cable umbilical i la seva manipulació es controla a partir de la pressió dels fluids de perforació. Quan aquesta pressió és superior a 20 bars, s'activa un sistema de vibració a 32 Hz que dirigeix la inserció del cilindre de mostreig en el subsòl. Aquest dispositiu s'utilitza per a materials durs i consolidats en que els mostrejadors WIP i PISTON fallen.

Els testimonis del Canal d'Eivissa es van recuperar mitjançant un testificador de pistó de tipus Kullenberg (Fig. 4.12b i c). Aquest dispositiu incorpora un contrapès de 200 kg que penja de la part superior mitjançant un braç unit al cos principal, de 1 tona de pes, el qual dona l'empenta per a que la llanxa de mostreig principal es clavi en el sediment. El cable que uneix el contrapès amb el mostrejador és més llarg que el mateix mostrejador, de manera que arriba al fons abans que l'extrem inferior de la llanxa. Quan el contrapès toca fons, acciona el braç i provoca que la llanxa, empesa pel cos principal, penetri en el fons en caiguda lliure. A l'interior de la llanxa, la presència d'un pistó crea una depressió a la superfície del sediment que afavoreix la intrusió. A la base de la llanxa, el sediment queda retingut per un sistema de làmines metàl·liques que es tanquen en forma de diafragma pel mateix pes del sediment contingut dins la llanxa.

4.4. Assajos i anàlisis de laboratori

4.4.1. Granulometries

La mida de les partícules de les mostres del delta del Llobregat i del Golf de Lleó s'ha mesurat amb un analitzador Coulter LS 100 mentre que les de l'esllavissament Ana ho han estat amb un model superior, el Coulter LS 230. El fonament d'aquests aparells és el mateix: les partícules d'una determinada

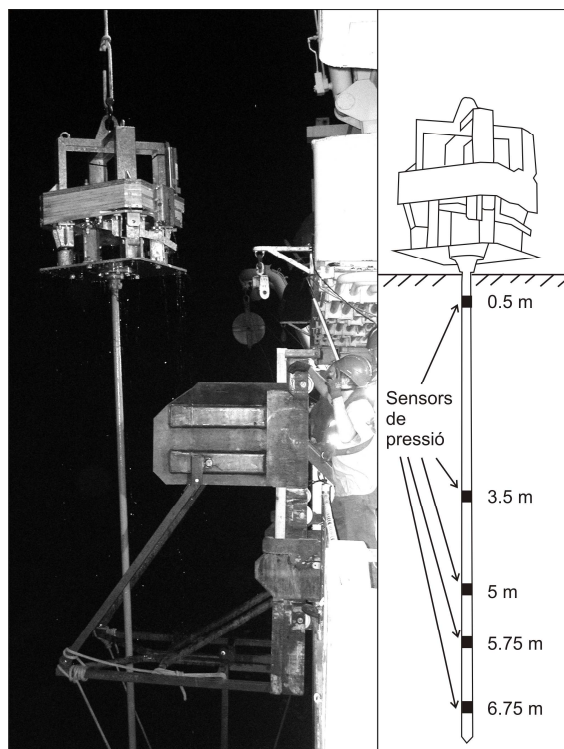


Figura 4.11. Assaig piezomètric amb llanxa de 12 m i 5 sensors de pressió a 0.5, 3.5, 5, 5.75 i 6.75 m. Fotografia presa durant la campanya PRISME a bord del N/O *L'Atalante* de l'IFREMER.

mida difracten la llum amb un angle determinat, més gran com més petita és la partícula. El mètode consisteix en fer passar un feix estret de llum monocromàtica (750 nm) a través de la mostra en solució en aigua filtrada. La diferència entre aquests models és que el LS 230 permet mesurar un rang de mides de gra més gran que el LS 100 (0,04 µm -2mm i 0,4µm-1mm, respectivament). Unes lents col·locades en un detector que mesura a diferents intervals de temps la distribució angular de la llum difractada permeten obtenir la mida de les partícules. La mida d'un gra de sediment proporcionada per aquest tipus d'analitzadors correspon al diàmetre d'una esfera que donaria una difracció equivalent a la de la partícula.

Totes les mostres de sediment analitzades van ser prèviament atacades dues vegades amb H₂O₂ al 10% durant 24 h per tal d'eliminar la matèria orgànica. Una vegada efectuats els atacs hom addiciona a la mostra una solució disgregant de polifosfat de sodi,

per a eliminar els possibles agregats provocats per la presència de matèria orgànica, els quals donarien una mida de gra superior i provocarien errors de mesura. Després, la solució disgregant amb la mostra es posa uns 15 minuts en un bany d'ultrasons i a l'agitador de mostres dues hores abans de fer l'anàlisi granulomètrica.

Les mostres del Golf de Lleó es van atacar posteriorment amb HCl al 3% per a eliminar la fracció carbonatada (cf. Cap. 5.2 i 5.3). La fracció grollera (diàmetre partícula >63µm) de les mostres de sediment del delta del Llobregat va ser tractada discrecionalment segons l'estat de disgregació de cada mostra. La fracció sorrenca disgregada va ser mesurada amb la tècnica del tamisat en sec, mentre que la fracció grollera ho fou mitjançant tamisat per xoc termostàtic. Totes dues fraccions foren pesades per a corregir la distribució granulomètrica obtinguda per l'analitzador de partícules.

4.4.2. Contingut en aigua

El contingut en aigua (o grau de saturació) d'un sediment es defineix com la ràtio del pes de l'aigua respecte del pes de la mostra total i s'expressa com un percentatge. Aquest percentatge es determina assecant les mostres saturades en un forn a 105°C durant 24 hores. La diferència entre la massa de la mostra abans i després d'assecar-la es considera igual a la massa d'aigua, M_w , a la mostra original. La massa de la mostra seca, M_s , es considera igual a la massa de les partícules sòlides. Dividint M_w per M_s hom obté el contingut en aigua:

$$wc = M_w/M_s \cdot 100 \quad [17]$$

4.4.3. Límits d'Atterberg

El límit líquid (w_l) i el límit plàstic (w_p) són el percentatge d'aigua (w_c) que determina el comportament mecànic del sediment. Quan $w_l > w_c$ es diu que el sediment es comporta com un líquid; si $w_p < w_c < w_l$, com un material plàstic, i si $w_p > w_c$, el sediment és fràgil.

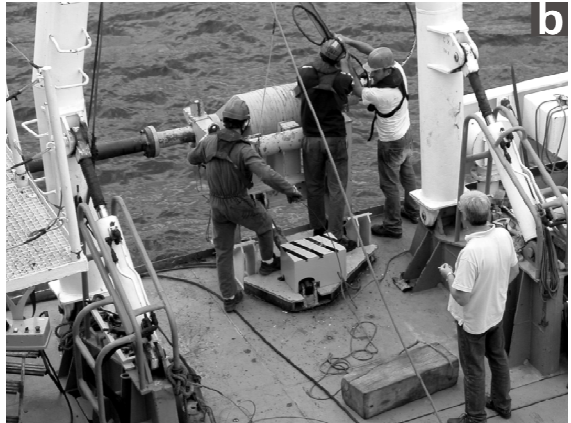
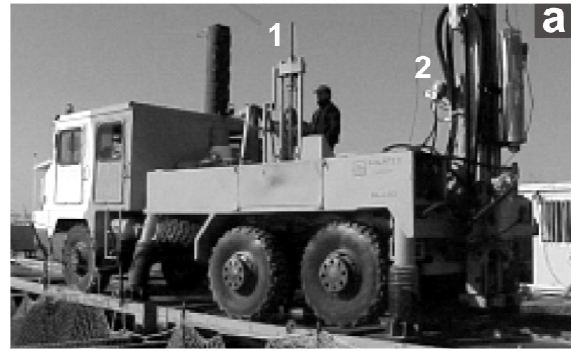


Figura 4.12. a, Camió equipat per a executar testis de sediment per rotació (1) i assajos de CP-TU (2); b i c, maniobres d'obtenció de testis de pistó a bord del N/O *L'Atalante*, de l'IFREMER.

Hom a calculat aquests límits a partir de mesures amb un con de caiguda lliure, anomenat també *fall cone* o con britànic (Fig. 4.13a), seguint la metodologia de Feng (2001). Aquest mètode està basat en el fet que la resistència a la cisalla (S_u) en el límit plàstic és 100 vegades superior a la S_u en el límit líquid. Aquesta relació indica que la penetració del con (d) al límit plàstic és 2mm (Fig. 4.14). A partir d'aquestes condicions,

Feng (2001) proposa una relació semi-logarítmica entre el contingut en aigua i d , la qual permet obtenir el w_l i el w_p . La relació entre aquestes dues propietats s'aconsegueix a partir de la realització de tres mesures de d per a continguts en aigua creixents (Fig. 4.14).

4.4.4. Resistència a la cisalla i angle de fricció interna

Su també ha estat determinada per mètodes directes, com el molinet de laboratori (*lab vane*) (Figs. 4.15a i b) i el molinet manual de torsió (*torvane*) (Fig. 4.15c). Tots dos aparells es basen en la mesura de la resistència a la cisalla circular que ofereix el sediment en sotmetre'l al moviment de rotació d'unes pales. Un altre aparell senzill que s'ha utilitzat és el penetròmetre de butxaca (Fig. 4.15d). Su també ha estat estimada a partir dels assajos de con de caiguda lliure seguint la relació proposada per Hansbo (1957):

$$Su = k \cdot W / d^2 \quad [18]$$

on k és la constant del con, igual a 0,85; W és el pes del con, igual a 0,785 N, i d és la penetració de la punta (Fig. 4.13b). També hem comptat amb dades de resistència i angle de fricció interna obtingudes mitjançant assajos triaxials. Per a més detalls sobre aquestes tècniques vegis Craig (2005) i Huang i Mayne (2008).

4.4.5. Assaig de consolidació unidimensional

Consisteix en un assaig que reproduïx les condicions de deformació i de drenatge del material en la vertical. La compressió vertical resulta de la compressió de la porositat del sediment confinat en una proveta dins la cel·la edomètrica. L'assaig edomètric consisteix en l'aplicació progressiva damunt la proveta d'esgraons de càrrega creixents fins assolir un màxim a partir del qual hom descarrega de nou la proveta de forma esgraonada. Hom permet el drenatge vertical dels fluids de la mostra, mercès a pedres poroses col·locades a sostre i base de la proveta. Per cada graó de càrrega, hom obté

al final de la consolidació una corba assentament-temps, de la qual hom n'extreu els paràmetres del model teòric de consolidació unidimensional, com ara el coeficient de consolidació, la permeabilitat i l'esforç de preconsolidació (per més detalls veure Terzaghi et al., 1996).

Els resultats dels assajos edomètrics fets en els sediments del Golf de Lleó han estat interpretats mitjançant el mètode de Grozic et al. (2003) (cf. Cap. 5.3), mentre que els de l'esllavissament Ana i els del ventall submarí del Nil (cf. Caps. 5.4 i 5.5, respectivament) han estat interpretats seguint el mètode de Casagrande (1936).

4.4.6. Calcimetria

Els continguts de carbonat càlcic (CaCO_3) han estat obtinguts amb el calcímetre de Bernard, que no és un mètode molt precís però que per la seva senzillesa i rapidesa d'execució és molt utilitzat en mecànica de sòls. Consisteix en atacar la mostra de sediment amb un volum conegut d'àcid clorhídric (HCl). El CO_2 gas resultant de la reacció del HCl amb el CaCO_3 present a la mostra es compara amb el volum de CO_2 gas produït a l'atacar una mostra patró amb la mateixa quantitat de HCl. Aquest mètode ha estat aplicat a l'anàlisi de carbonats dels sediments de l'esllavissament Ana (cf. Cap. 5.4).

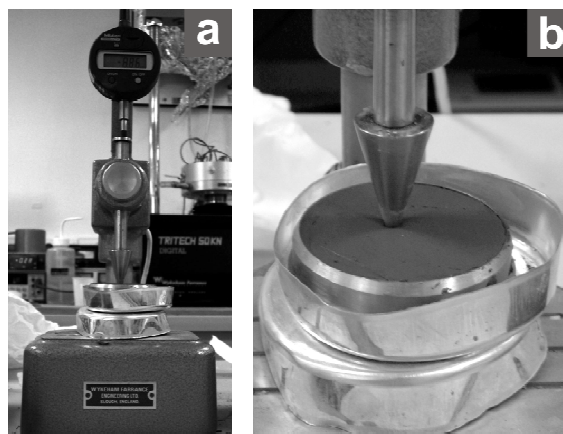


Figura 4.13. Assaig de laboratori per determinar límits d'Atterberg i resistència a la cisalla. a, Con de caiguda (*fall cone*); b, exemple d'assaig de penetració amb el con de caiguda en una mostra de sediment argilós.

4.4.7. Matèria orgànica

El contingut en carboni orgànic mesurat en els sediments de l'esllavissament Ana (cf. Cap. 5.4) s'ha obtingut amb un analitzador elemental LECO CS-125 del CEFREM (França). L'aparell consisteix un forn d'inducció on es produeix la combustió de les mostres. L'anàlisi del carboni total i del sofre es fa en mostres de sediment prèviament assecades i atacades amb àcid clorhídric per a eliminar la fracció carbonatada. La combustió de la mostra es realitza a 680°C en presència d'oxigen, de manera que el CO₂ resultant s'analitza mitjançant un detector de raigs infrarojos. Hom considera que el CO₂ mesurat és proporcional al carboni orgànic present a la mostra.

En els sediments del ventall submarí del Nil (cf. Cap. 5.5), el contingut en matèria orgànica es va obtenir mitjançant la calcinació de la matèria orgànica de les mostres a 550°C durant 2h, després d'haver-les assecat a 105°C durant 24h. Hom considera que la diferència de pes entre la mostra total i les cendres resultants correspon a la quantitat de matèria orgànica present al sediment.

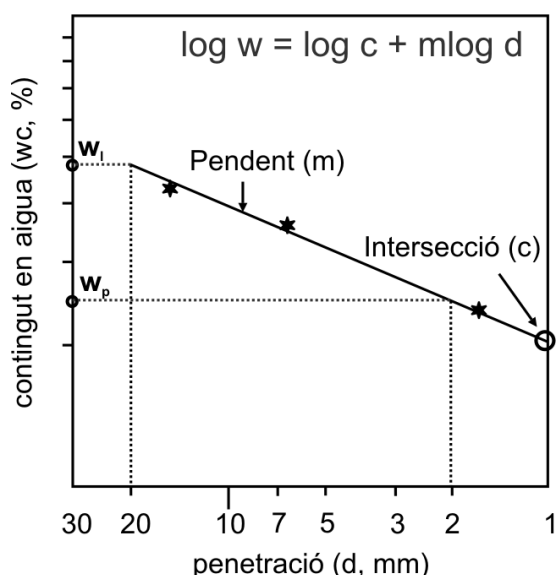


Figura 4.14. Mètode de Feng (2001) per a interpretar el límits d'Atterberg (w_l i w_p) a partir de tres mesures de la penetració de la punta del con de caiguda (Fig. 4.13) en mostres de sediment amb contingut d'aigua creixent.

4.4.8. Composició elemental

La composició elemental dels testimonis de sediment recuperats a l'esllavissament d'Ana (cf. Cap. 5.4) s'ha analitzat amb un escàner de fluorescència de raigs X (XRF core-scanner) Avaatech, el qual permet fer l'anàlisi elemental no destructiva i en continu de seccions de sediment. El sistema utilitza un tub de Rh com a font de raigs X, amb la qual s'exciten els elements químics del sediment. Quan aquests retornen al seu estat estable emeten un senyal en forma de fluorescència que es diferencia energèticament per a cada element. La mesura s'efectua amb un detector que proporciona l'espectre d'energia de la mostra.

A partir de l'espectre obtingut hom pot calcular les concentracions dels elements majors, menors i els traça presents a la secció de sediment. La informació que ens dona cada element depèn de la procedència del sediment i dels processos que han intervingut en la seva formació. Per aquesta raó, cal tenir un bon coneixement de la provenença dels sediments a fi i efecte d'arribar a interpretacions consistents. Algunes de les

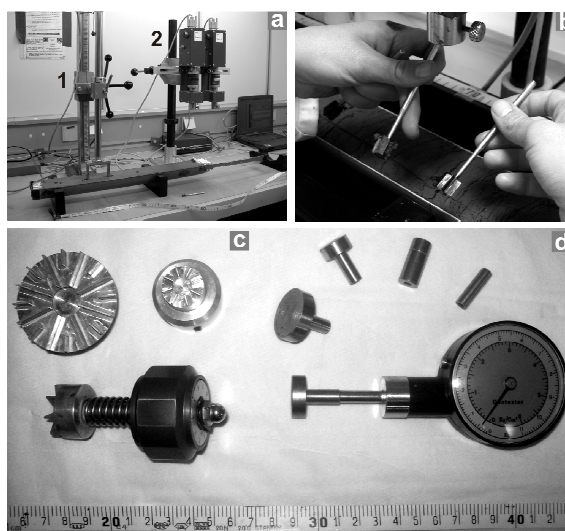


Figura 4.15. a, Aparell de mesura de la propagació de les ones P (1) en testimonis de sediment oberts i molinet de laboratori (2); b, detall de les pales del molinet que proporcionen la torsió per mesurar la resistència a la cisalla; c, molinet de butxaca (torvane) i d, penetròmetre de butxaca per mesurar la resistència a la penetració.

aplicacions principals de les mesures obtingudes són la correlació entre testimonis, interpretacions estratigràfiques preliminars, identificació de la procedència dels aportos en ambients sedimentaris terrígens, reconeixement de processos diagenètics i identificació de nivells característics com sapropels i capes de cendres (Richter et al., 2006).

4.4.9. Propietats físiques

La velocitat de transmissió de les ones P (V_p), l'atenuació dels raigs gamma i la susceptibilitat magnètica s'han mesurat en seccions senceres, sense obrir, amb un perfilador de testimonis de múltiples sensors (*multi-sensor core logger, MSCL*). L'atenuació dels raigs gamma, també anomenada densitat gamma, és proporcional a la densitat total del sediment saturat. La V_p , la densitat gamma i la susceptibilitat magnètica s'associen a variacions litològiques. En sediments terrígens, les fraccions grolleres presenten densitats gamma i V_p més grans, mentre que les fraccions fines presenten valors inferiors (Weaber et al., 1997). La susceptibilitat magnètica informa de les variacions del contingut en minerals ferromagnètics, indicador molt utilitzat en la correlació de seqüències sedimentàries (Larrasoana et al., 2008). Aquesta tècnica s'ha aplicat en els sediments saturats del Golf de Lleó (cf. Cap. 5.3) i de l'esllavissament Ana (cf. Cap. 5.4).

4.5. Mètodes geofísics

4.5.1. Batimetria de multifeix

Per les àrees marines estudiades (cf. Caps. 5.2, 5.3, 5.4 i 5.5) hem disposat de mapes batimètrics detallats adquirits mitjançant la tècnica de la batimetria de multifeix. Aquestes dades s'obtenen a partir de sondes instal·lades en el buc de vaixells oceanogràfics que emeten un nombre elevat de feixos acústics en forma de ventall, d'una freqüència determinada, perpendicularment a la direcció d'avenç del vaixell. El temps que triguen a

tornar a la superfície les ones reflectides en el fons informa sobre la profunditat. Les ecosondes de multifeix aporten informació addicional sobre el tipus de fons a partir del control efectuat sobre l'atenuació de la intensitat observada entre el senyal emès i el rebut, anomenada intensitat de retrodifusió (*backscatter*).

Les dades batimètriques del Golf de Lleó provenen d'un recull de dades obtingudes amb diversos tipus de sondes, integrades en el model digital del terreny del Golf de Lleó a escala 1:100.000 (Berné et al., 2002a, 2004). Les de l'esllavissament d'Ana foren adquirides durant les campanyes BIG'95 i CD178 a bord del *BIO Hespèrides* i el *RSS Charles Darwin*, respectivament, els anys 1995 i 2005, amb l'ecosonda EM12 de Simrad. L'adquisició de les dades batimètriques del delta de Nil s'explica a Loncke et al. (2004).

4.5.2. Sísmica de reflexió

Mètode de perfilatge acústic del subsòl marí constituït per una font d'energia que genera polsos acústics, un sistema d'adquisició per a enregistrar el senyal de tornada reflectit al fons i subfons, i un sistema d'enregistrament i processat. L'energia continguda en els polsos acústics permet que es transmetin per l'aigua en totes direccions i que penetrin el sediment. Aquesta energia es reflecteix i refracta a través de les discontinuïtats del subsòl marí a les quals corresponen contrastos d'impedància acústica, que es defineix com el producte de la densitat per la V_p . Hom recull el conjunt de senyals reflectits a les interfícies acústiques mitjançant una línia d'hidròfons (flauta o *streamer*) remolcada pel vaixell, i els enregistra en temps real.

Hom a treballat amb tres tipus de perfils sísmics: (i) de molt alta resolució (ecosonda paramètrica TOPAS), obtinguts a la campanya oceanogràfica Marinada, efectuada l'any 2002 a bord del *BIO Hespèrides* (cf. Cap. 5.4); (ii) d'alta resolució de multicanal adquirits durant la campanya MARION l'any 2000 a

bord del *N/O Le Suroit* de l'IFREMER a partir d'una font formada per un conjunt de canons d'aire comprimit de tipus mini-GI i GI i amb un *streamer* de 300 m de llarg i 24 canals (cf. Cap. 5.2 i 5.3); i (iii) de gran penetració en el cas del ventall profund del Nil, on la configuració del sistema i les característiques precises dels perfils sísmics estan sotmeses a un acord de confidencialitat (cf. Cap. 5.5). L'enregistrament i el tipus de processat aplicat en cada cas es detallen en cadascun dels subcapítols del Capítol 5.

4.6. Mètodes de representació 3D

El model tridimensional del delta del Llobregat (cf. Cap. 5.1) s'ha realitzat mitjançant el programa EarthVision (Dynamic Graphics, Inc). Es tracta d'un programa d'anàlisi geoespial multidimensional, de modelització i visualització d'objectes geològics. El mètode estadístic emprat per a la construcció del model 3D es detalla al Capítol 5.1.