

## 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](http://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](http://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](http://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 6**

DISCUSSIÓ

Arribats a aquest punt, volem fer notar que les discussions sobre la interpretació de les dades i el seu significat cas per cas són ja incloses en els articles científics que formen el Capítol 5 d'aquesta Tesi. Per aquest motiu, en el present capítol ens limitarem a fer una discussió creuada de la qual en puguem extreure, si s'escau, regles o lliçons d'aplicació més general.

### 6.1. Identificació del perfil estratigràfic

La bona resolució de les anàlisis granulomètriques realitzades en els testimonis del delta del Llobregat i les perforacions del Golf de Lleó ha permès il·lustrar el potencial dels perfils de CPT i CPTU en la identificació del perfil estratigràfic. En seqüències heterogènies en que la resposta a l'assaig de CPTU varia de drenada a no drenada, els perfils de resistència ( $q_c - q_t$ ) i també de pressió ( $u_2$ ) mostren amb gran exactitud les alternances de nivells de sorres (resposta drenada), llims i argiles (no drenada) (cf. Cap.5.1). En alguns casos en els que la recuperació de mostres de sediment ha estat parcial, com a les unitats sorrenques de la base de la perforació PRGL2 (cf. Cap. 5.2), els perfils de resistència han permès reconèixer la presència de seqüències granulomètriques que altrament no haurien estat detectades. En canvi, a les seqüències formades majoritàriament per fins, com les del talús del Golf de Lleó (cf. Cap. 5.3), els perfils de fricció ( $f_s$ ) esdevenen claus en el perfilament de variacions granulomètriques dins del rang de fraccions fines ( $< 63 \mu\text{m}$ ). La relació entre la resistència normalitzada i la ràtio de fricció  $Q_t/FR$  ha permès associar les variacions del perfil de  $f_s$  amb variacions de la cohesió, conseqüència directa de variacions en les proporcions entre argiles i llims (cf. Cap. 5.2). Aquests resultats contrasten amb el que típicament s'ha descrit a la literatura sobre l'ús dels perfils de  $f_s$ , considerats menys precisos que  $q_c$  i  $u_2$  pel fet de correspondre a valors promig de la fricció exercida al llarg del mànec del penetròmetre (cf. Cap. 4.1.1).

La resolució dels perfils estratigràfics basats en perfils de CPTU és funció de la capacitat de l'aparell de detectar canvis de resistència a les transicions entre nivells de granulometria diferent, ja que la transició entre un nivell i un altre no sempre s'enregistra com un canvi marcat de  $q_c$  (Lunne et al., 1997). L'estratigrafia identificada en el Golf de Lleó s'ha avaluat seguint el treball de Ahmadi i Robertson (2005), on es mostra que la magnitud de  $q_c$  en un nivell de sorres denses intercalat en argiles toves és inferior a la que realment li correspondria si el seu gruix fos 28 vegades inferior al diàmetre del con. L'avaluació d'aquest gruix límit, desenvolupada en el Capítol 5.2, pot ésser estesa a tots els cassos d'estudi marins (cf. Cap. 5.4 i 5.5), ja que s'emprà el mateix penetròmetre estàndard. Més concretament, aquest gruix límit correspon a 1 m. En canvi, la magnitud de  $q_c$  en nivells de sorres molt poc consolidades sota l'efecte d'un esforç vertical de 70 kPa (al voltant de 8,5 m de profunditat considerant un sediment argilós sota condicions hidrostàtiques) mostra que aquest gruix mínim és 0,3 m. En tots els cassos estudiats, les seqüències estratigràfiques contenen unitats els gruixos de les quals són superiors als gruixos límit detectables, de manera que hom considera que la resolució dels perfils estratigràfics està compresa en el rang de gruixos detectables per l'aparell.

L'estudi del delta del Llobregat és un exemple de l'aplicabilitat dels perfils estratigràfics interpretats a partir d'assajos de CPTU en la construcció de models estratigràfics 3D. El model presentat en el Cap. 5.1 permet determinar la distribució espacial dels perfils estratigràfics i, a més, permet calcular els volums dels cossos sorrencs (Lafuerza et al., 2004).

### 6.2. Classificació dels sòls

La interpretació del tipus de material a partir de les mesures de CPTU està determinada per la resposta a la penetració. En seqüències sedimentàries formades per alternances d'argiles ( $< 8 \mu\text{m}$ ), llims ( $8 < \phi < 63 \mu\text{m}$ ) i sorres ( $> 63 \mu\text{m}$ ), essent la fracció sorra  $> 25\%$ , la resposta

està caracteritzada per variacions de la penetració, que és drenada en els nivells de sorres i no drenada en els nivells fins (argiles i llims). Aquests contrastos de drenatge es tradueixen en classificacions dels materials molt representatives de les fàcies sedimentàries presents, com hom ha pogut observar a les seqüències del delta del Llobregat (cf. Cap. 5.1) i a l'estació PRGL2 de la plataforma externa del Golf de Lleó (cf. Cap. 5.2). En canvi, en materials de granulometria fina (fracció sorrenca < 10%), caracteritzats per respostes no drenades, els mètodes de classificació a partir de dades de CPTU no permeten diferenciar les variacions entre les fraccions llim i argila, ja que la resposta no drenada és similar, com hem observat a les seqüències de talús del Golf de Lleó (cf. Cap. 5.3) i del marge balear del Canal d'Eivissa (cf. Cap. 5.4).

La comparació entre els mètodes de classificació de Robertson i Ramsey (cf. Cap. 4.1.4) per les seqüències sedimentàries del Golf de Lleó (cf. Cap. 5.2) mostra que en materials fins en els que no hi ha pèrdues significatives de la saturació ambdós mètodes donen resultats semblants. En el cas concret de la seqüència formada per alternances de sorres, llims i argiles de la plataforma externa, la pèrdua total de la saturació en unitats sorrenques deguda a cavitació (Lunne et al., 1997) implica que el mètode de Ramsey basat en els paràmetres normalitzats  $Q_t/B_q$  no sigui fiable (Ramsey, 2002). Per tant, en presència de fraccions grolleres hom aconsella usar el mètode de Robertson. Al Canal d'Eivissa, on els sediments són rics en carbonats (> 40%, cf. Cap. 5.4), només hem aplicat la classificació de Ramsey, ja que permet identificar canvis en la sensibilitat relacionats amb la gènesi d'aquest tipus de sediment (Ramsey, 2002). Malauradament, la llargada limitada dels testimonis recuperats no ha permès establir la relació entre el canvi de sensibilitat que apareix a la capa de feblesa i a les dues unitats adjacents i el contingut en carbonat (cf. Cap. 5.4).

### 6.3. Estat de consolidació

L'estimació de l'estat de consolidació realitzada a les seqüències de talús (cf. Caps. 5.3, 5.4 i 5.5) es basa en la relació entre l'esforç de preconsolidació  $\sigma'_p$  i la resistència neta  $q_{net}$  a través del paràmetre  $N_{\sigma_t}$ , tot i seguint Demers i Leroueil (2002) (cf. Apèndix A Cap. 5.3). Aquests autors trobaren que en argiles marines sensibles sobreconsolidades del Quebec, a Canadà, un  $N_{\sigma_t}$  igual a 3,4 és una bona aproximació per a interpretar l'estat de consolidació. Ara bé, a l'hora d'aplicar aquest tipus d'aproximacions empíriques, i concretament els valors de  $N_{\sigma_t}$  a contextos diferents, cal tenir present el caràcter local d'aquest valor i, per tant, que la seva extrapolació pot dur a estimacions errades.

En el cas del Golf de Lleó, per a  $N_{\sigma_t}$  igual a 3,4 hom obtingué valors de la ràtio de sobreconsolidació OCR equivalents a erosions de fins a 30 m que no han estat observades al registre sedimentari (cf. Cap. 5.3). En aquest cas concret, la bona qualitat dels assajos edomètrics realitzats en els sediments de la perforació PRGL1-5 (cf. Cap. 5.3), permeté establir un perfil de  $N_{\sigma_t}$  variable segons els valors de  $\sigma'_{pOEDO}$  i les variacions granulomètriques. Es tracta, per tant, d'un perfil continu de  $N_{\sigma_t}$  de caràcter local vàlid pel Golf de Lleó. Al Canal d'Eivissa, en canvi, la baixa qualitat dels resultats edomètrics ens dugué a considerar el rang de valors de  $N_{\sigma_t}$  entre 2 i 5 proposats per Lunne et al. (1997) (cf. Cap. 5.4). Només al ventall submarí del Nil (cf. Cap. 5.5) ha resultat apropiat un  $N_{\sigma_t}$  igual a 3,4.

Tot plegat reforça, si hom vol obtenir un bon perfil de l'estat de consolidació (expressat com OCR o  $\sigma'_p$ ), la necessitat de disposar de valors de control del paràmetre  $N_{\sigma_t}$ , ja sigui a través d'estimacions de l'esforç de preconsolidació a partir d'assajos edomètrics o d'estudis previs en sediments similars. D'altra banda, cal comprovar que els resultats obtinguts concorden amb el marc d'estudi regional i encara amb altres possibles indicadors. Hom ha avaluat l'estat de consolidació a partir de la normalització de la resistència a la cisalla no dre-

nada  $S_u$  respecte l'esforç vertical efectiu  $\sigma'_{v0}$  amb l'índex de plasticitat  $I_p$  segons la relació proposada per Skempton (Craig, 2005). En el cas del Canal d'Eivissa,  $S_u/\sigma'_{v0} \sim 0,25$  en condicions de consolidació normal, mentre que als sediments del ventall submarí del Nil és  $\sim 0,3$ . A partir del perfil continu de  $S_u/\sigma'_{v0}$  derivat de les dades de CPTU, hom ha pogut demostrar la concordança entre les consolidacions deduïdes a partir de la  $\sigma'_p$  i  $S_u/\sigma'_{v0}$  (cf. Cap. 5.3, 5.4 i 5.5).

#### 6.4. Sobreconsolidació i sotaconsolidació

Els perfils d'OCR i de la  $S_u$  normalitzada ( $S_u/\sigma'_{v0}$ ) del talús del Golf de Lleó i de les seqüències de referència del Canal d'Eivissa (cf. Caps. 5.3 i 5.4) indiquen que el grau de sobreconsolidació ( $OCR > 1$  i  $S_u/\sigma'_{v0} > 0.25$ ) dels sediments va disminuint en profunditat, essent màxim en superfície, a jutjar pels pics positius en el primer metre ( $OCR > 4$  i  $S_u/\sigma'_{v0} > 0.5$ ), tot i passant seguidament a sediments sotaconsolidats ( $OCR < 1$  i  $S_u/\sigma'_{v0} < 0.25$ ). Al Golf de Lleó, aquesta transició està situada entre 9 i 12 m sota el fons (cf. Cap. 5.3), mentre que a les seqüències de referència del Canal d'Eivissa és entre 8 i 13 m (cf. Cap. 5.4). Tenint en compte que arreu els sediments superficials marins estan aparentment sobreconsolidats (Richards, 1984), hom considera que la transició entre sediments sobreconsolidats i sotaconsolidats observada s'associa al límit d'acció dels mecanismes de sobreconsolidació aparent. Aquests són: (i) l'envelliment del sediment, (ii) la cimentació (Terzaghi et al., 1996) i (iii) l'existència de pressions osmòtiques (Sultan et al., 2000). Per sota d'aquest interval, l'estat de consolidació de les seqüències del talús del Golf de Lleó i les del Canal d'Eivissa no afectades per l'esllavissament d'Ana és sotaconsolidat. És a dir, que aquests sediments presenten pressions intersticials en excés o sobrepressions ( $\Delta u$ ), ja que el seu esforç de preconsolidació ( $\sigma'_p$ ) és inferior a l'esforç vertical efectiu ( $\sigma'_{v0}$ ).

Hom considera que l'absència de intervals normalment consolidats amb  $OCR = 1$  ( $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$ ) és indicativa de que la presència de sobrepressió en seqüències de talús no afectades per moviments de massa és més comuna del que es coneix. Aquesta afirmació és lògica tenint en compte que els talussos submarins estan constituïts essencialment per materials cohesius susceptibles de desenvolupar sobrepressions, caracteritzats per permeabilitats molt baixes (per ex.,  $2 \cdot 8 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , cf. Cap. 5.4). La sobrepressió estimada ( $\Delta u = \sigma'_{v0} - \sigma'_p$ ) a les seqüències sedimentàries estudiades no afectades per mecanismes d'inestabilitat confirma, encara més si cal, que la presència de sobrepressions és prou generalitzada. Així ho il·lustren algunes de les mesures realitzades al ventall submarí del Nil (cf. Cap. 5.5) i dins de l'esllavissament Ana (cf. Cap. 5.4).

#### 6.5. Avaluació de l'estabilitat de talussos submarins

La sobrepressió identificada en els tres talussos submarins estudiats, dels quals dos afectats per moviments de massa (cf. Caps. 5.4 i 5.5), palesa que l'excés de pressió és un paràmetre clau en l'avaluació de l'estabilitat. Els assajos de laboratori poden utilitzar-se com una alternativa a les mesures *in situ*, com les de CPTU, per avaluar les propietats geotècniques que permetin descriure el comportament mecànic del sediment com, per exemple, la resistència a la cisalla. Però a l'hora de detectar l'excés de pressió, els assajos de laboratori no poden substituir de cap manera els assajos *in situ* ja que en la majoria de casos el fet d'extreure la mostra i portar-la al laboratori comporta un canvi brutal de les condicions de pressió originals les quals, a més, són molt difícilment reproduïbles reproduir al laboratori (Sultan et al., 2004). En aquest context, els assajos de CPTU poden ésser considerats una de les eines més apropiades per a detectar sobrepressions, ja sigui per mitjà d'assajos de dissipació a les profunditats desitjades o bé a través de les relacions empíriques mostrades en aquesta Tesi. D'altra banda, tot i que en el present treball potser

no hi hem fet l'èmfasi que es mereixen, els perfils de resistència a la cisalla derivats de l'assaig de CPTU demostren que aquest assaig permet identificar plans de discontinuïtat amb gran precisió i nivells de feblesa efectius i potencials. Aquesta última aplicació és també un factor rellevant en l'estudi de l'estabilitat de talussos (Canals et al., 2004a).

La principal font de sobrepressió en sediments submarins és la prevenció de l'escapament de fluids intersticials durant la consolidació (Lee et al., 2007). Si la velocitat de sedimentació és suficientment elevada, com és el cas en sistemes deltaics com el Mississipí o el Nil, es creen excessos de pressió intersticial donat que, per dir-ho curt i ras, la taxa d'acumulació anul·la l'efecte de la permeabilitat dels sediments d'afavorir llur desfluidificació. En seqüències sedimentàries formades per sediments fins de baixa permeabilitat, els fluids intersticials, al no poder ésser alliberats, suporten la sobrecàrrega sedimentària, la qual cosa es tradueix en un increment de la pressió intersticial. Aquest és el mecanisme que explicaria els nivells sobrepressionats identificats a la seqüència del ventall submarí del Nil aquí estudiada (cf. Cap. 5.5), atribuïble a les elevades taxes de sedimentació que caracteritzen el sistema sedimentari del Nil (Ducassou et al., 2007).

Una altra circumstància que genera excessos de pressió és la presència de gas en el sediment la qual pot ésser deguda a tres causes principals. (i) acumulacions d'origen biogènic, generalment metà, per degradació de la matèria orgànica, comú en sistemes deltaics on han quedat atrapades grans quantitats de matèria orgànica d'origen fluvial (Orange et al., 2005; García-García et al., 2006; García-García et al., 2007); (ii) migració de fluids, en fase líquida o gasosa, procedents de fonts profundes, a través de discontinuïtats físiques, la qual pot generar sobrepressions notables; i (iii) migració d'aigües subterrànies provinents d'aqüífers costaners, la qual pot afectar la pressió intersticial de sediments del talús.

En aquesta Tesi, el primer cas quedaria il·lustrat pel talús del Golf de Lleó. Considerem que la sobrepressió identificada en aquest lloc d'estudi prové, amb alta probabilitat, de la degradació de la matèria orgànica associada a les potents acumulacions sedimentàries alimentades pel riu Roine. La segona causa, la migració de fluids provinents de fonts profundes, sol produir-se en ambients afectats per hidrotermalisme i/o vulcanisme. Tenint en compte també el treball d'Acosta et al. (2002), entenem que aquest mecanisme proporciona l'explicació més plausible a la sobrepressió observada a la zona de l'esllavissament d'Ana, al Canal d'Eivissa. Finalment, en cap dels llocs d'estudi considerats en aquesta Tesi hem trobat indicis de sobrepressions atribuïbles a la influència d'aigües subterrànies.