

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.



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

Memòria de Tesi Doctoral

Sara Lafuerza
Novembre 2009



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

ÍNDEX

Índex.....	i
Agraïments.....	v
Resum i abstract.....	ix
Símbols i acrònims.....	xiii
Presentació de la Tesi i objectius.....	xv
CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ.....	1
CAPÍTOL 2. CONTEXT REGIONAL.....	5
2.1. Fisiografia general de la Mediterrània.....	7
2.2. Masses d'aigua i circulació.....	7
2.3. Evolució geodinàmica i estratigrafia de les subconques mediterrànies.....	9
2.3.1. Conca Occidental	9
2.3.2. Conca Oriental	12
2.4. Impacte de les oscil·lacions climàtico-eustàtiques.....	13
2.5. Processos de desestabilització.....	17
CAPÍTOL 3. AMBIENTS SEDIMENTARIS ESTUDIATS.....	19
3.1. Delta del Llobregat.....	21
3.2. Talús continental del Golf de Lleó.....	21
3.3. Talús del Canal d'Eivissa.....	21
3.4. Ventall submarí del Nil.....	23
CAPÍTOL 4. DADES I METODOLOGIA.....	25
4.1. L'assaig de penetració estàtica de con (CPT/CPTU).....	27
4.1.1. Característiques.....	27
4.1.2. Tècniques d'execució.....	30
<i>Penetració superficial (seabed mode).....</i>	<i>30</i>
<i>Penetració profunda (down-the-hole mode).....</i>	<i>30</i>
4.1.3. Interpretació.....	31
<i>Correccions</i>	<i>31</i>
<i>Paràmetres normalitzats.....</i>	<i>32</i>
4.1.4. Classificació dels sòls.....	32
4.1.5. Perfil estratigràfic geotècnic.....	34
4.1.6. Paràmetres geotècnics derivats.....	34
<i>Pes específic.....</i>	<i>34</i>
<i>Resistència a la cisalla no drenada</i>	<i>35</i>
<i>Sensitivitat.....</i>	<i>37</i>
<i>OCR i esforç de preconsolidació.....</i>	<i>37</i>
4.2. Altres assajos i mesures in situ.....	38
4.2.1. Piezòmetre.....	38
4.2.2. Diagrafies de pous.....	38
4.3. Mostreig de sediment.....	39
4.4. Assajos i anàlisis de laboratori.....	40
4.4.1. Granulometries.....	40
4.4.2. Contingut en aigua.....	41
4.4.3. Límits d'Atterberg	41

4.4.4. Resistència a la cisalla i angle de fricció interna.....	42
4.4.5. Assaig de consolidació unidimensional.....	42
4.4.6. Calcimetria.....	42
4.4.7. Matèria orgànica.....	43
4.4.8. Composició elemental.....	43
4.4.9. Propietats físiques.....	44
4.5. Mètodes geofísics.....	44
4.5.1. Batimetria de multifeix.....	44
4.5.2. Sísmica de reflexió.....	44
4.6. Mètodes de representació 3D.....	45
CAPÍTOL 5. RESULTATS.....	47
5.1. Characterization of deltaic sediment bodies based on in situ CPT/CPTU profiles: A case study on the Llobregat delta plain, Barcelona, Spain.....	49
Abstract.....	49
5.1.1. Introduction.....	51
5.1.2. Regional setting.....	51
5.1.3. Materials and methods.....	53
5.1.3.1. CPT/CPTU tests: measurements and procedures.....	53
5.1.3.2. 3D modelling.....	56
5.1.4. Results.....	57
5.1.4.1. Sediment facies characterization based on q_c and FR.....	57
5.1.4.2. Identification of sediment bodies from the 3D model.....	58
5.1.5. Discussion.....	59
5.1.6. Conclusions.....	62
Acknowledgements.....	63
5.2. Subseafloor stratigraphic profiling and soil classification from piezocone tests: A case study in the Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea).....	65
Abstract.....	65
5.2.1. Introduction.....	67
5.2.2. Materials and methods.....	67
5.2.3. Results.....	68
5.2.3.1. CPTU tests at PRGL1 site.....	68
5.2.3.2. CPTU tests at PRGL2 site.....	69
5.2.4. Discussion.....	71
5.2.4.1. Soil classification from CPTU measurements.....	71
5.2.4.2. Stratigraphic profiling from CPTU profiles.....	73
5.2.4.3. Correlation between CPTU-based geotechnical stratigraphy and high resolution seismic profiles.....	74
5.2.5. Conclusions.....	76
Acknowledgements.....	77
5.3. Overpressure within upper continental slope sediments from CPTU data, Gulf of Lion, W Mediterranean.....	79
Abstract.....	79
5.3.1. Introduction.....	81
5.3.2. Study area.....	82
5.3.2.1. Geological setting.....	82
5.3.2.2. Site description.....	82
5.3.3. Materials and methods.....	83
5.3.3.1 Borehole information.....	83

5.3.3.2. <i>In situ</i> measurements.....	83
5.3.3.3. <i>Laboratory tests and age model</i>	84
5.3.3.4. <i>Borehole-seismic data correlation</i>	85
5.3.4. Results.....	85
5.3.4.1. σ'_p from laboratory tests.....	85
5.3.4.2. σ'_p from piezocone measurements.....	86
5.3.4.3. <i>Overpressure</i>	87
5.3.5. Discussion.....	88
5.3.5.1. <i>Stress history related to geological processes</i>	88
5.3.5.2. <i>Overpressure and sea level variations</i>	92
5.3.6. Conclusions.....	95
Acknowledgements.....	96
Appendix A.....	96
A.1. CPTU background information.....	96
<i>Corrections and derived parameters</i>	96
<i>Dissipation tests</i>	96
A.2. Grain size analyses.....	96
Appendix B.....	97
Methodology for CPTU and laboratory based stress history analysis.....	97
<i>Definition of preconsolidation pressure and overconsolidation ratio</i>	97
<i>CPTU approach</i>	97
Appendix C.....	97
C.1. Overpressure and related concepts.....	97
<i>Overpressure and excess pore pressure</i>	97
<i>Overpressure estimated from downhole logs</i>	97
<i>Overpressure ratio</i>	98
<i>Excess pore pressure generated by sedimentation</i>	98
C.2. Shear strength from CPTU data.....	98
Appendix D.....	98
D.1. Gas release and exsolution as a continuous flow.....	98
D.2. Dissipation of the pore pressure.....	98
5.4. Overpressure as triggering mechanism of Ana slide (Eivissa Channel, Western Mediterranean)	99
Abstract.....	99
5.4.1. Introduction.....	101
5.4.2. Geological setting.....	102
5.4.3. Materials and methods.....	103
5.4.3.1. <i>PENFELD penetrometer</i>	103
5.4.3.2. <i>Piezometer</i>	104
5.4.3.3. <i>Sediment cores</i>	104
5.4.4. Results.....	106
5.4.4.1. <i>Undisturbed sediments</i>	106
5.4.4.2. <i>Remoulded sediments</i>	109
5.4.4.3. <i>Overconsolidation</i>	109
5.4.4.4. <i>Overpressure ratio</i>	111
5.4.4.5. <i>Pore pressure from piezometer</i>	112
5.4.5. Discussion.....	112
5.4.5.1. <i>Current overpressure</i>	112
5.4.5.2. <i>Fluid escape evidences and preconditioning factors</i>	113
5.4.5.3. <i>Sources of overpressure</i>	114

5.4.5.4. <i>Geotechnical approach</i>	116
5.4.6. Conclusions.....	117
Acknowledgements.....	117
Appendix.....	117
A. <i>CPTU derived parameters</i>	117
B. <i>Overconsolidation based on CPTU data</i>	117
C. <i>Erosion involved in the headscarp area</i>	118
D. <i>Overpressure ratio based on CPTU data</i>	118
E. <i>Piezometer interpretation</i>	118
F. <i>Sample quality evaluation from oedometer curves</i>	118
5.5. Climate and sea-level imprints on the Quaternary sedimentary succession of the Nile Deep Sea Fan from in situ and laboratory testing	119
Abstract.....	119
5.5.1. Introduction.....	121
5.5.2. Methods.....	121
5.5.3. Results and Discussion.....	122
5.5.3.1. <i>Sediment types after well log data</i>	122
5.5.3.2. <i>Geotechnical properties from CPTU and laboratory measurements</i>	123
5.5.3.3. <i>Climate and sea-level imprints on sediment properties</i>	125
5.5.4. Conclusions.....	126
Acknowledgements.....	126
CAPÍTOL 6. DISCUSSIÓ	127
6.1. Identificació del perfil estratigràfic	129
6.2. Classificació dels sòls	129
6.3. Estat de consolidació	130
6.4. Sobreconsolidació i sotaconsolidació	131
6.5. Avaluació de l'estabilitat de talussos submarins	131
CAPÍTOL 7. CONCLUSIONS	133
CAPÍTOL 8. REFERÈNCIES	137

AGRAÏMENTS

Al llarg dels anys que he passat al GRCGM realitzant la Tesi m'he topat amb multitud de persones que han fet possible arribar al final d'aquesta etapa. Un camí mariner que m'ha permès travessar molt més que la Mediterrània. El punt de partida d'aquesta aventura marinera és el director d'aquest treball, el Miquel Canals. Quan encara estudiava la llicenciatura, un bon dia aquest "gat vell" em va proposar anar de campanya oceanogràfica al Pacífic amb un grup d'investigació dels Estats Units. Jo, de mena inquieta i amb un coet al cul quan de viatjar es tracta, no m'ho vaig pensar ni un segon. No sé com s'ho va fer venir, però enloc de navegar pel Pacífic vaig acabar a la Mediterrània amb un grup de personatges que van canviar els plans que jo tenia per quan acabés la carrera. Aleshores jo treballava com a becària en una empresa familiar de geotècnia, Geotec 262. Però passar un mes sencer envoltada d'aigua i descobrir que a través d'aquelles sondes podia veure el que des de la coberta d'aquell buc oceanogràfic no veia, em va fascinar. Aquells personatges, que tot just havia conegut a alta mar, em van assegurar que acabaria treballant amb ells. Pocs mesos després de la primera campanya, aquest "gat vell" em va proposar un tema de Tesi del qual en sabia tant poc com jo. Gràcies al Miquel, a la nostra desconexió, he pogut moure'm arreu del món per anar a buscar dades, persones que em recolzessin, respostes a les meves preguntes. Set anys després, navegant una vegada més amb els meus companys del GRCGM, he tingut la certesa que no em vaig equivocar a l'haver triat aquesta aventura.

El Pere Busquets també és responsable dels inicis d'aquesta Tesi. Va ser ell qui em va proposar fer un Treball de Fi de Carrera basat en dades de CPTUs del Delta del Llobregat. En aquell moment jo no tenia ni la mínima idea de què eren els CPTUs, però com els meus plans eren dedicar-me a la geotècnia, vaig acceptar. Al tornar de la meua aventura marinera li vaig explicar lo bé que m'ho havia

passat i la seva resposta va ser que si realment volia i tenia l'oportunitat d'investigar, no m'ho pensés. I així va ser. Gràcies pel consell, Pere.

L'altre persona clau en aquesta Tesi és el Nabil Sultan, de l'IFREMER. Va ser ell qui em va explicar en què consistien els assajos geotècnics de laboratori i em va donar més d'un cop de mà quan no entenia res dels perfils de CPTUs del Golf de Lleó que tenia davant dels nassos. Va ser a la campanya PRISME, al 2007, dirigida pel Nabil en la que, per primera vegada, vaig tenir l'oportunitat d'adquirir jo mateixa, al Canal d'Eivissa, les peces finals d'aquest trencaclosques. Una campanya en la que vaig descobrir que totes aquelles propietats geotècniques que m'havien fregit el cervell en tantíssimes ocasions podien ordenar-se de manera entenedora, donant sentit al meu treball; l'última empenta per poder enllestir el repte que suposa acabar una Tesi. *Merci*, Nabil. De l'equip IFREMER vull destacar al Gwen, la Maria Angela, el Bernard, el Serge, el Didier, l'Antonio, el Ricardo, l'Azzedine, l'Angelique i el Sébastien; personatges que des del 2004 fins ara han aparegut una o varies vegades per ajudar-me a desfer els nusos mariners cada cop que anava a Brest a treballar. A gran part d'aquesta colla els hi dec la coautoria dels meus articles, llargues estones corregint-los i discutint sobre ells; i com no, bons moments acompanyats de mantega bretona.

Gràcies al Martin Galavazi vaig passar quatre mesos interpretant dades de CPTU i diagrames de pous a Fugro Engineers BV, en una Holanda grisa i plujosa, on vaig tenir l'oportunitat de ficar el nas en l'empresa més gran del món dedicada a la investigació geotècnica en medis marins. Allà vaig fer-me una idea del que implicava obtenir de les profunditats les dades que tant necessitava jo per dibuixar aquesta Tesi. Vull també mencionar l'Edwin Terwoort, de Fugro Engineers BV, que va tenir una paciència tremenda en explicar-me el funcionament de les bases de dades de Fugro i en barallar-se amb aquelles tedioses fulles de càlcul per a

que jo aconseguís les dades. A Holanda vaig endurir-me gràcies als trenta quilòmetres diaris en bicicleta als que em va sotmetre el Leo Plugge, qui em va acollir com si fos de la seva família, qui em va explicar centenars de vegades les mateixes històries viscudes per algú que porta treballant més de 25 anys a Fugro.

El descans posterior a la cursa per aconseguir dades de sota les pedres el vaig tenir al Quebec, on el Jacques Locat i el Serge Leroueil, de *l'Université de Laval*, em van acollir extraordinàriament al *Département de Géologie et de Génie Géologique*. En aquell gèlid racó del món vaig acabar de redactar el meu segon article mentre vivia el pas de la tardor a les nevades hivernals quebequeses, assistia a classes magistrals de mecànica de sòls en un francès que quasi bé no entenia i gaudia dels aperitius durant els seminaris setmanals. La Genevieve Couchon i l'Ariane Locat van ser un gran suport gràcies a xerrades infinites sobre com interpretar perfils de CPTU.

Al llarg d'aquest temps he anat amunt i avall. Indonèsia, Filipines, Taiwan, Turquia, Egipte, Marroc, Cuba, Canadà, Estats Units, Europa...Sense aquests viatges no hagués tingut la voluntat ni la motivació per tirar endavant una Tesi que veia borrosa, incapaç de dibuixar. Els meus atacs de desesperació sempre acabaven amb bon humor gràcies a la Maria, la Mireia, la Laia, la Bastanist, la Raquel, la Mariona; les flors amb les que vaig compartir moments entranyables als carrers Viladomat i Ricart. Fins que vaig anar a petar al Carmel, amb l'Alexandre, antic company de Geotec 262, amb qui vaig passar moments extraordinaris, llargues nits acabant articles i barallant-nos amb fórmules tedioses, discussions sobre geotècnia, el sentit de fer una Tesi, el nostre futur com a geòlegs. Però el meu camí em va portar a terres més baixes, al carrer Planeta de la Vil·la de Gràcia, on gràcies a la Laura vaig centrar-me en l'etapa final de la Tesi. Fins que vaig tornar cap a Mataró, als orígens. Gràcies a la seva vida tranquil·la vaig trobar la serenor per desfer

els últims nusos al voltant de la Tesi. Això no hagués estat possible sense el suport dels pares, la Mariví i el Javi, sense l'entranyable Jana i el petit Guiu, i tota la colla de mataronins que he anat retrobant, com l'Anna, l'Arena, l'Alba i la Diana.

Però l'alegria amb la que he realitzat la meua aventura marinera durant aquests dos últims anys es deu principalment a dues cordes i un barra. Gràcies Marina, em vas fer un dels millors regals que he tingut: descobrir aquesta eina tan meravellosa, el trapezi. Gràcies a tu i a l'energia que vam crear amb la Leti, la Lola, la Kat, la Laura, la Marta, la Lynda, la Marce, el Jordi i el Jorge, vaig aprendre a volar. Gràcies per tants bons moments, plataneres. I com no, allà on vaig puc volar, i a Mataró, Cronopis em va acollir. Gràcies Marineta, Eli, Benet, Berta, Ferriol, Jordi; gràcies pels Cabarets, per oferir-me la màgia del circ. Gràcies, trapezi. Gassho. I aquí, és on hi ha l'espai per agrair-vos profundament, Mònica, Pierre, Núria, Concha, Vane,..., les llargues estones en silenci. Sense elles no hagués superat els entrebancs ni hagués trobat el sentit d'investigar en les profunditats.

Però fins ara no he esmentat ni de bon tros als principals personatges d'aquest Cabaret: els meus companys d'aventura. Fa set anys eren uns, ara n'hi ha de nous. Però els nostres trens sovint s'entrecreuen, i així ho espero en el futur. El màxim responsable dels moments de *despilfarro* temporal, de plorar de riure, d'enfadar-me com un gos rabiüt, de tenir converses històriques, i de tenir certa clarividència al final d'aquesta etapa, deixant de banda les infinites hores que va passar solucionant-me els problemes informàtics quan vaig arribar al GRCGM, és el Galde. Gràcies Jaume per haver-me pescat les dades de CPTU del Golf de Lleó, haver fet les granulometries i haver accedit a ser coautor d'un article amb mi; però el que més t'agraeixo són els caps de setmana a Massalió fent la verema, collint cireres i menjant paella, que hagi escoltat les meves *pàjares* mentals i hagi compartir l'esperit aventurer.

David, company de carrera, gràcies per ser tan equilibrat i tenir tanta empena, per estar disposat a ajudar, a portar-nos a tot el clan *pal monte*, per les botifarrades, calçotades i boletades, per portar-me a fer el saltimbanqui a Taradell; et dedico una desenroscada triple. A l'Anna, la tremenda treballadora *quixotes* qui sempre té energia i tantes vegades m'ha escoltat i m'ha fet costat des d'aquella primera campanya meva, ara farà set anys. La Diana, pel seu bon humor i la seva calma alhora d'afrontar els moments difícils de la Tesi i demostrar-me que no cal patir. A l'Olaia, per saber tant de les coses de les que jo no en sé, per acollir-me quan perdo el tren (i pels seus animals de companyia Nina i Gon), per compartir la música, pel seu genial bon humor i per haver nascut el mateix dia que jo, amb tot el que això comporta. Al Sergi Costa li dono les gràcies per ser tan educat i tan bon paio, carai, per solucionar-me els problemes informàtics i per elucubrar plegats sobre els *triggering mechanisms* de l'esllavissament Ana. A la Ruth i a la Camino els hi estic tremendament agraïda per haver-me ajudat a trobar els invisibles errors en el manuscrit d'aquesta Tesi a última hora, a part d'infinidat de bons moments com els cafès de mitja tarda. A la Catalina, el Xavi Rayo, el Leo, la Gema, el Centella, la Neus, la mini Ruth, el Pedrito, la Gemma, la Pilar, la Patri, la Vero, l'Ana; a tots els hi agraeixo haver compartir amb mi moments entranyables en les campanyes oceanogràfiques i haver-me suportat a la sala de becaris. A l'Elisenda i la Patricia Cabello, per ser tan lluitadores amb la Tesi, regalar-me llibres que m'il·lustren tot sovint i els ànims que m'heu donat en la recta final. Gràcies Joan i Tina, per haver-me animat i valorat el meu esforç com qui més i haver-me acollit a New York i a Noruega.

Al Toni, la Isa, el Jose, el Roger i l'Àngelo pels consells sobre com i què fer amb els meus dubtes. Al Marcelo Devincenzi i al Marcos Arroyo, per haver-me dedicat el seu temps per discutir sobre els meus entrebancs amb els CPTUs i pel seu suport al congrés de Taiwan. A la Montse, la Teresa i les secretàries del Departament d'Estratigrafia,

Paleontologia i Geociències Marines, pel suport tècnic i burocràtic al llarg d'aquests anys.

I finalment, no hi hagut persona més important al voltant de la meva "carrera" que l'avi. Joaquín Lafuerza feia més preguntes que jo quan sentia parlar de fòssils de milions d'anys, minerals del mantell i sediments marins de milers de metres de fondària; cada dia a l'arribar a casa em preguntava què havia après d'extraordinari. I se'n va anar quan jo vaig encetar la meva aventura marinera, quan travessava la Mediterrània per primera vegada. No podia haver estat més poètic. Ell era un romàntic, i les seves últimes paraules van ser: *ahora que por fin te vas a navegar, aprovecharé para venir contigo*. I així ha estat. Lafuerza està d'alguna manera representada en aquest esforç.

A banda de personatges, hi ha una banda sonora. Resumir aquí els milers de pentagrames que m'han acompanyat és impossible, però sempre n'hi ha que es repeteixen, com el John Coltrane, el Charlie Parker, el Chet Baker, la Billy Holiday, i l'Ella amb el Louis Armstrong. I com sovint passa, en tota funció hi ha un tema clau, d'aquells que se't fiquen el cap, aquells que no pararies de cantar, com *el You can get it if you really want*, del Jimmy Cliff.

Potser m'he excedit un xic donant les gràcies, però no vull reduir ni una de les paraules dites, ja que totes elles configuren el pilar d'aquesta Tesi. Altra vegada, gràcies, *merci*.

RESUM

Aquesta Tesi Doctoral tracta de l'aplicació de l'assaig de penetració *in situ* (CPTU) en l'estudi de les propietats geotècniques i sedimentològiques del recobriment sedimentari a quatre ambients sedimentaris de la Conca Mediterrània: la plana deltaica del delta del Llobregat, la plataforma externa i el talús superior del Golf de Lleó i el talús balear del Canal d'Eivissa, a la Conca Mediterrània Occidental, i el ventall submarí del Nil, a la Conca Mediterrània Oriental.

Aquest estudi es basa principalment en perfils de CPTU, altres assajos *in situ* com el piezòmetre i les diagrames de pous, anàlisis sedimentològiques de mostres de sediment, anàlisis geotècniques de laboratori i dades geofísiques. La disponibilitat de dades a partir d'aquest ampli ventall de tècniques ha estat possible mercès a la col·laboració amb la indústria destinada a la caracterització geotècnica dels fons marins. Els perfils de CPTU obtinguts a les seqüències sedimentàries investigades han permès reconèixer el gran potencial que té aquesta tècnica en la identificació del tipus de sediment i les seves propietats geotècniques. Els resultats obtinguts mostren que la resistència normalitzada i la ràtio de fricció proporcionades pels CPTU constitueixen paràmetres molt útils per al reconeixement de tendències granulomètriques. Més precisament, hom ha demostrat que la fricció constitueix un paràmetre molt útil en la detecció de variacions granulomètriques en seqüències formades per materials fins, com les del talús del Golf de Lleó. D'altra banda, els perfils de la seqüència deltaica del delta del Llobregat han mostrat que la resistència no corregida també pot ésser representativa d'alternances de materials fins i grollers.

Hom ha estimat l'estat de consolidació pels tres casos d'estudi del talús continental tot i aplicant la relació empírica basada en la relació entre la ràtio de sobreconsolidació, l'esforç de preconsolidació i l'esforç vertical efectiu. Mercès a aquesta aproximació hem

vist que sota el nivell de sobreconsolidació aparent que la majoria de seqüències sedimentàries marines presenten, els sediments que no han estat afectats per processos de desestabilització solen presentar sobrepressió. On hi ha paquets de materials esllavissats, com al ventall submarí del Nil, els perfils de CPTU han permès identificar el grau de sobreconsolidació dels nivells reemmotllats. Aquesta sobrepressió respon a les condicions sedimentàries i estructurals de cada indret.

Al Golf de Lleó, la sobrepressió està associada a nivells relativament més grollers i permeables en els que hom hi ha detectat la presència de gas. Es tracta de nivells condensats dipositats en períodes d'alt nivell eustàtic. Hom atribueix l'acumulació de gas en aquests nivells a la degradació de la matèria orgànica i/o a la migració ascendent de gas, com suggereix la presència d'un cràter d'escapament (*pockmark*) de grans dimensions a tocar del punt d'assaig. Hom associa la sobrepressió a episodis de disminució de la pressió hidrostàtica que causaren l'exsolució del gas acumulat principalment en aquests nivells condensats; exsolució que es produiria durant les fases de nivell eustàtic baix dels darrers 340 ka. En canvi, al talús balear del Canal d'Eivissa, hom associa la sobrepressió amb la presència de capes carregades de bombolles de gas, possiblement d'origen volcànic o hidrotermal. Aparentment, aquest gas s'acumulà preferentment en un nivell més groller i amb menor resistència a la cisalla (nivell feble o *weak layer*), tal i com ho indiquen el perfil corresponent i valors de sensitivitat molt elevats. Hom considera que aquests dos factors preconditionants (acumulació de gas i nivell feble) expliquen el desencadenament de l'esllavissament d'Ana, i el fet particular que allà on s'ha trobat erosió no hi ha sobrepressió, la qual cosa indicaria que la sobrepressió es dissipà per l'erosió associada a l'esllavissament.

ABSTRACT

The present PHD Thesis deals with the application of the *in situ* cone penetration test (CPTU) in the study of the physical and geotechnical properties of the sediment record at four sedimentary environments of the Mediterranean Basin: the Llobregat delta plain, the outer shelf and the upper slope of the Gulf of Lion in the western basin, and the Nile deep sea fan, in the eastern basin.

This study is mainly focused on CPTU profiles, other *in situ* tests such as the piezometer and well logs, sedimentological analyses, laboratory geotechnical analyses and geophysical data. Data availability from such a wide range of tools is thanks to the collaboration with the industry focussed on the seafloor geotechnical characterization. CPTU profiles acquired in the studied sedimentary sequences allowed to recognize the large potential of the CPTU in identifying sediment type and providing its geotechnical properties. Results obtained show that CPTU derived normalised resistance and friction ratio are the most reliable parameters when interpreting grain size trends. Particularly, we demonstrate that friction constitutes a promising parameter when dealing with fine-grained sedimentary successions, as we found in the upper slope of the Gulf of Lion. Moreover, CPTU profiles in the sedimentary successions of the Llobregat Delta show that CPTU direct resistance measures can be very useful when interpreting heterogeneous sediments, such as coarse levels within fine-grained sedimentary sequences.

We have estimated the consolidation state for the three continental slope study cases by applying the empirical approximation which defined the overconsolidation ratio as the ratio between the preconsolidation pressure and the vertical effective stress. Thanks to this approximation we observe that the below the apparent overconsolidation that characterised marine sedimentary sequences the sediments that remain unaffected by instability processes are usually underconsolidated due

to the existence of overpressure. Where slided materials occur, such as those we found in the Nile deep sea fan, CPTU profiles allowed to identify the overconsolidation ratio in the remoulded sediments. Overpressure is related to particular sedimentary and structural conditions of each study case.

In the Gulf of Lion, overpressure is related to coarse-grained levels where we identify gas. Such levels correspond to condensed layers that were deposited under high sea level conditions. We associate the gas accumulation in these levels to the organic degradation and/or an upward gas seepage, as suggested by the existence of a close pockmark. We link the overpressure to hydrostatic pressure diminutions causing gas exsolution during prolonged periods of sea level lowering of the last 340 kyr. In contrast, at the balearic slope of the Eivissa Channel, we link overpressure to gas charging likely of volcanic or hydrothermal origin. Apparently, the gas was preferentially accumulated in a coarser layer in which the shear strength is lower (weak layer), as suggested by the corresponding profile and high values of sensitivity. We consider both features (gas charging and weak layer) the preconditioning for the Ana slide, as well as the fact that where erosion is found no overpressure is identified, thus suggesting that overpressure was locally dissipated by the slide.

SÍMBOLS

Δu	excés de pressió o sobrepressió
Δu_{CPTU}	sobrepressió obtinguda a partir de CPTU
Δu_{LOGS}	sobrepressió obtinguda a partir de diagrames de pou
Δu_e	pressió d'equilibri
Δu_s	sobrepressió generada per càrrega sedimentària
ϕ	porositat/angle de fricció interna/ diàmetre de partícula
γ	densitat gamma
γ_s	pes específic grans de sediment
γ_w	pes específic de l'aigua
λ	índex de compressió
λ^*	ràtio addimensional de sobrepressió
σ_v	esforç total vertical
σ'_v	esforç efectiu vertical
σ'_{v0}	esforç efectiu vertical in situ
σ_{v0}	esforç vertical total in situ
σ'_p	esforç de preconsolidació
σ'_{pa}	esforç de preconsolidació obtingut pel mètode de Casagrande
σ'_{pb}	esforç de preconsolidació obtingut pel mètode d'Onitsuka
τ	resistència a la cisalla

ACRÒNIMS

a	ràtio area del con
Ac	superfície total del con
AC	<i>Algerian Current</i> , Corrent d'Algèria
AIS	<i>Atlantic-Ionian Stream</i> , Corrent Atlàntico-Jònica
AmC	<i>Asian minor Current</i> , Corrent d'Àsia Menor
AMIGE	<i>Arctic Marine Engineering Geological Expeditions</i>
An	superfície del con interior
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AW	<i>Atlantic Water</i> , Aigua Atlàntica
BF	<i>bulk sediment fraction</i> , fracció de sediment total

Bq	ràtio de pressió
Cap.	capítol
cf.	<i>confer</i> , comparis amb
CFE	<i>carbonate free sediment fraction</i> , fracció de sediment terrigen
Corg	carboni orgànic
COSTA	<i>COntinental slope STAbility</i>
COT	Carboni Orgànic Total
CPT	<i>Cone Penetration Test</i> , assaig de penetració de con
CPTU	Piezocon
D	penetració del con de caigua lliure
Dh	difusivitat hidràulica
e.g.	<i>exempli gratia</i> , per exemple
e_0	ràtio vuides inicial
EMDW	<i>Eastern Mediterranean Deep Water</i> , aigua fonda de la Mediterrània oriental
ENAM	<i>European North Atlantic Margin</i>
EUROSTRATAFORM	<i>European sediment transport routes and mechanisms from river mouth to continental margin</i>
Fig.	Figura
FR	<i>friction ratio</i> , ràtio de fricció
f_s	fricció mesurada pel CPTU
f_t	fricció corregida
g	gravetat
HERMES	<i>Hotspot ecosystem research on the margins of european seas</i>
hrs.	Hores
HST	<i>Highstand System Tract</i>
i.e.	<i>Id est</i> , és a dir
IFREMER	<i>Institut de Recherche pour l'Exploitation de la Mer</i>
II	índex de liquiditat
Ip	índex de plasticitat
ISSMFE	<i>International Society for oil Mechanics and Foundation Engineering</i>
k	constant del con de caiguda lliure
Ka	kilo anys
LIW	<i>Levantine Intermediate Water</i>
LST	<i>Lowstand System Tract</i>
Ma	milions d'anys
mbsf	<i>meters below sea floor</i> , meters per sota del fons marí
MMJ	<i>Mid Mediterranean Jet</i> , Jet Mediterrani Mig

Ms	massa de la mostra seca
NSCL	<i>Multi Sensor Core Logger</i>
Mw	massa de l'aigua
NC	<i>Northern Current</i> , Corrent del Nord
$N_{\sigma t}$	parameter empíric del con
N_k	parameter empíric del con
OCR	Overconsolidation ratio, ràtio de sobreconsolidació
PROMESS	<i>PROfiles across MEditerranean Sedimentary Systems</i>
psu	<i>practical salinity units</i>
q_c	resistència en punta
q_t	resistència corregida
q_{net}	resistència neta
Q_t	resistència normalitzada
STEAM	<i>Sediment Transport on the European Atlantic Margin</i>
STRATAGEM	<i>Stratigraphic development of the glaciated European margin</i>
S_t	<i>sensitivitat</i>
Su	resistència a la cisalla no drenada
Su/σ'_{v0}	resistència a la cisalla no drenada normalitzada, factor Shansep
TST	Transgressive System Tract
Tv	factor de temps
u	excés de pressió mesurada pel CPTU
u_0	pressió in situ o d'equilibri
u_h	pressió hidrostàtica
u_1	pressió davant del con
u_2	pressió darrera del con
u_3	pressió darrera del mànec de fricció
UMG	Últim Màxim Glacial
Vp	velocitat ones p
Vp_w	velocitat ones p de l'aigua intersticial
Vp_s	velocitat ones p sediment
W	pes del con de caiguda lliure
wc	contingut en aigua
wl	límit líquid
wp	límit plàstic
WMDE	<i>Western Mediterranean Deep Water</i> , Aigua fonda de la Mediterrània occidental
yr	<i>years</i> , anys
yrBP	<i>years Before Present</i> , anys abans del present
z	fondària

PRESENTACIÓ DE LA TESI

Actualment, els assajos geotècnics *in situ* constitueixen les eines més avançades per estudiar en detall les propietats físiques del subsòl, terrestre o marí, entre els quals, l'assaig de penetració (CPT), o la seva variant anomenada piezocon (CPTU), n'és una de les més valuoses. Aquesta eina permet mesurar les característiques dels sediments sense necessitat de mostrejar-los, fet que suposa un notable guany de temps i un apreciable estalvi econòmic. Tot i que aquestes eines són cada cop més utilitzades per la indústria, l'accés a les mateixes per part de la comunitat acadèmica dedicada a les Geociències Marines segueix essent escàs, degut en part a que la logística i les infraestructures necessàries queden lluny del seu abast. De fet, aquesta Tesi arrencà de la constatació de la conveniència de considerar noves tècniques, concretament la del CPTU, per a caracteritzar el registre sedimentari tot i fent èmfasi en el seu potencial d'aplicació a l'anàlisi de l'estabilitat dels fons marins.

Aquesta Tesi, confeccionada sota la modalitat de recopilació d'articles publicats i sotmesos a revistes referenciades en els *Journal Citation Reports* de l'*Institute for Scientific Information*, consta de set capítols. El Capítol 1 és una breu introducció general en la que hom justifica breument la necessitat de caracteritzar acuradament el recobriment sedimentari per avaluar el risc associat als processos de desestabilització. En els capítols 2 i 3 hom descriu els contextos regionals i els ambients sedimentaris dels quatre indrets investigats a la Mar Mediterrània. En el Capítol 4 hom s'ocupa, amb més èmfasi i més sistemàticament que en el capítol de resultats (cf. Cap. 5), de la descripció de la metodologia emprada, de l'origen de les dades primàries de CPTU utilitzades, i dels materials addicionals usats per a les correlacions amb les dades de CPTU. En el Capítol 4 hom descriu amb cert detall els mètodes d'interpretació de les dades de CPTU, donat que és l'eina principal d'aquest treball. També es descriuen els assajos de laboratori

realitzats en mostres de sediments i els mètodes geofísics emprats per a comparar i validar les dades de CPTU. Noteu també que cadascun dels articles que conformen el Cap. 5 inclou un apartat, més o menys breu, sobre els mètodes, les tècniques i les dades emprades en cada cas.

El Capítol 5 inclou cinc articles, tres ja publicats i dos que s'enviaran per publicació. Els ambients deltaics estan representats pel delta del Llobregat (cf. Cap. 5.1); els ambients de plataforma externa i talús superior amb influència mixta (fluvial - onatge) han estat investigats al Golf de Lleó (cf. Caps. 5.2 i 5.3); els ambients de talús superior d'influència carbonatada són il·lustrats pel marge balear del Canal d'Eivissa (cf. Cap. 5.4); mentre que el talús mig amb forta influència fluvial correspon al ventall profund del Nil (cf. Cap. 5.5).

Pel que fa al Cap. 5.1, l'obtenció d'un conjunt de CPTs/CPTUs i testimonis de sediment procedents del subsòl de la nova estació d'aigües residuals (EDAR) del Llobregat, situada a la plana deltaica, ha permès caracteritzar les fàcies sedimentàries a partir de mesures de resistència proporcionades pel CPTU. Mercès als nombrosos CPTUs disponibles hom ha pogut confeccionar un model tridimensional del subsòl de l'EDAR, basat en el paràmetre de la resistència.

El Cap 5.2. s'ha nodrit de dades de CPTU i de testimonis llargs de sediment de la plataforma i el talús superior del Golf de Lleó, els quals han permès comprovar que en seqüències heterogènies amb sediments fins i grollers la classificació de sòls proporciona una identificació acurada de les variacions granulomètriques, mentre que en seqüències homogènies formades per materials fins la classificació pot portar a interpretacions errònies.

En el Cap. 5.3 hom mostra l'aplicació del CPT en la detecció de nivells sedimentaris amb sobrepressió associats a l'existència de gas en el talús superior del Golf de Lleó.

En el Cap. 5.4 hom aplica el mètode presentat al Cap. 5.3 per a determinar l'estat de consolidació del sediment amb l'objectiu d'esbrinar la relació entre la consolidació i els mecanismes de dispar de l'esllavissament Ana al Canal d'Eivissa.

Finalment, en el Cap. 5.5 hom compara l'estratigrafia i les propietats geotècniques extrems del CPTU amb el registre de diagrafies de pous obtingudes en una seqüència sedimentària afectada per moviments de massa en el talús mig del ventall profund del Nil.

El Cap. 6 és consagrat a la integració i discussió, tot i que breu, dels resultats presentats al Cap. 5. Els cassos d'estudi han permès identificar els factors més rellevants que cal considerar a l'hora d'interpretar la naturalesa i l'estratigrafia dels materials a partir de perfils de CPTU, així com llur aplicació en l'estimació de l'estat de consolidació dels sediments. Qüestions metodològiques a banda, aquesta Tesi ha permès identificar la presència de sobrepressió a partir de dades de CPTU en diferents ambients sedimentaris, la qual cosa ens ha dut a considerar l'ús del CPTU en estudis d'inestabilitat del fons marí.

Les conclusions d'aquesta Tesi i els suggeriments sobre activitats futures per aprofundir més i resoldre millor algunes de les qüestions plantejades es presenten en el Cap. 7.

OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquesta Tesi és palesar el potencial de l'assaig de CPTU per a investigar la litologia, l'estratigrafia i les propietats geotècniques de seqüències sedimentàries marines en ambients sedimentaris diferenciats. Amb aquesta finalitat hem considerat quatre indrets diferents de la Mar Mediterrània, en els quals hem fet un èmfasi especial en l'aplicació de l'assaig de CPTU en l'anàlisi de l'estabilitat del recobriment sedimentari.

Altrament, els objectius específics plantejats són:

(1) Avaluar quines són les propietats més significatives derivades dels CPTU de cara a determinar el perfil estratigràfic i les propietats sedimentològiques de seqüències sedimentàries marines.

(2) Avaluar l'aplicació de les relacions empíriques basades en dades de CPTU per a estimar l'estat de consolidació del sediment.

(3) Determinar la relació entre els mecanismes que condicionen l'estabilitat de talussos submarins i l'estat de consolidació i l'existència de plans de feblesa inferits a partir de relacions empíriques basades en dades de CPTU en indrets amb evidències de desestabilització.

(4) Valorar els avantatges i la complementaritat que ofereix el CPTU en relació amb els assajos convencionals de laboratori i altres tècniques de prospecció, com els perfils de sísmica de reflexió, les diagrafies de pous i els assajos piezomètrics.