



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Programa de Doctorado: Programa de Promoción del Conocimiento

Departamento de Física Aplicada

Universitat Politècnica de València

ESTUDIOS DE DEGRADACIÓN Y ALTERABILIDAD DE ROCAS BLANDAS Y SU APLICACIÓN A LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN FACIES TAP DENTRO DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

Autor:

FERNANDO GARRIGÓS SANCHIS

Director:

FRANCISCO JAVIER TORRIJO ECHARRI

Tutor:

FRANCISCO JAVIER PALLARÉS RUBIO

Valencia, febrero de 2015

Número total de volúmenes de la obra: 1

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR POR LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Esta tesis esta dedicada a las dos Marías
de mi vida, la que me la dio y la que me la
volvió a dar.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi amigo y director de Tesis Javier Torrijo su ayuda en el planteamiento, desarrollo y redacción de la presente tesis y por permitirme disfrutar a su lado de la investigación y trabajo que ha representado. Sin duda que sus ideas respecto a la línea de investigación fueron fundamentales y su conocimiento, indispensable. Ha sido un placer compartir con él los kilómetros de carretera, las pendientes de los taludes y por supuesto, los almuerzos y tertulias. Gracias Javi por tus consejos, tu compañía y sobre todo, por tu amistad que es sin duda, lo más importante.

Agradezco a los profesores del Departamento de Ingeniería del Terreno los conocimientos proporcionados durante la fase de formación hace ya muchos años, así como todos sus comentarios y ayuda mostrados en la fase de búsqueda de información para esta tesis y apoyados por su participación en congresos, proyectos y otras investigaciones relacionadas.

Agradezco especialmente a mi querido amigo desde la etapa de estudiante Rafael Cortés, director del Departamento, por estar siempre para todo, por toda su inestimable ayuda sin la cual este trabajo no se hubiera llevado a cabo y la gente que en él ha participado no se hubiera conocido ni unido para trabajar en él. Gracias Rafa, por poner esto en marcha y por todo lo demás.

Gracias también al resto de compañeros del Área de Geología por su colaboración y ayuda, en especial a Ángel por su apoyo en todo momento y su buena disposición para el trabajo.

Gracias al personal técnico de los laboratorios por dar sentido a tanta gráfica, ensayo, números y datos.

Muy importante para mi, dar las gracias a Miguel Ángel Eguíbar, profesor del Departamento de Hidráulica e Hidrología de la Escuela y por encima de todo, amigo. El montó el puzle de personal y medios para que esta tesis se pudiera realizar, presentándome a Javier y no dejándonos solos ni un momento, interesándose como uno más del equipo de trabajo por todo lo que ocurría. Además, sus conocimientos y aportaciones han sido pieza clave en la interpretación de resultados y en la comprensión de fenómenos con componente hidráulica. Gracias Migue, te puedes sentir orgulloso.

Gracias también a las personas que han intervenido por parte del departamento de Física Aplicada desde donde arrancó mi doctorado. Gracias a Manuel Martín por ayudarme tanto en los cursos de Doctorado y en la obtención del DEA, por supuesto a mi compañero y amigo Fran Pallarés que además es el tutor de este trabajo y a su colaboración y consejos en su desarrollo. Gracias a Pilar Capilla y Teresa Casquero por hacerme tan fácil la burocracia universitaria.

Gracias también a los compañeros y Administraciones responsables de las obras que hemos visitado o de las que hemos tomado muestras o fotografías por su colaboración.

Gracias a mis compañeros de doctorado, a mis compañeros de trabajo en el Ayuntamiento de Valencia, especialmente a José Javier por ayudarme respetando los tiempos que le pedía para

dedicarme a esto en momentos puntuales y como no, a Lourdes, mi querida concejal, quien siempre me ha dado su cariño y apoyo en esto y en todo lo demás. Gracias Lourdes.

Gracias a mi querido amigo Pascual por animarme siempre a seguir y por estar siempre que lo he necesitado como amigo y como médico.

Sin duda, este trabajo se ha hecho porque mi hijo Nicolás estaba siempre mirándome desde abajo y porque quiero que siempre vea grande a su papi. Te quiero Nico, todo vale la pena por ti. Y a ti María José por aguantarme, por darme siempre tu cariño, la mano cuando estaba cansado y porque sin ti no sé vivir.

Y a vosotros papá y mamá, qué os voy a decir... os debo estar aquí, mi educación y todo lo que me ha permitido llegar a hacer este trabajo. Gracias por animarme a seguir, por vuestro ejemplo y esfuerzo siempre que la vida ha sido dura con nosotros, por enseñarme a ser constante y a no dejar que los problemas hagan las ilusiones imposibles. A vosotros os dedico todo mi esfuerzo.

A mi hermano Jose, que hace ya tiempo que no está con nosotros, le agradezco seguir estando y ayudarme en todo lo que he hecho en la vida, marcándome siempre el camino correcto y la forma de rectificar, Gracias Jose, sé que estás orgulloso.

Un recuerdo también para el resto de mi familia, los que están y me siguen aguantando y los que ya se fueron.

Valencia, febrero de 2015.

ABSTRACT

This work stems from conversations with engineers and technicians from various government agencies and observation of pathologies in road cuttings and excavated materials Facies Tap the railroad. These connectors undergo degradation processes much faster. This has an economic impact on the maintenance of the road network and also on the safety of the same.

Therefore, the overall objective of this thesis is the characterization of soft, evolutionary and argillaceous rocks, which are the Tap Facies the southern province of Valencia and the northern half of the province of Alicante, taking as a starting point field criteria and standard laboratory tests that allow to predict the behavior of connectors (associated civil works) to be built in this material medium and long term.

The soft rock, clay component, variably carbonated, are one of the most common types of sedimentary rocks, and our geography occur frequently, alternating with well cemented limestone banks, constituting the Facies Tap that are Miocene geological epoch.

Not currently has a complete classification for such materials, nor is there a standard test or criterion to assess the potential degradation of these materials and their behavior at work.

Thus, it has revised the existing classifications and a new classification of these rocks based on petrological-textural criteria is proposed.

The new classification of these materials better application in geological and geomechanical characterization of Facies Tap reasonably to help predict what will be the behavior of the slope medium to long term, compared to surface erosion and degradation.

In order to characterize these materials have been several campaigns characterization and field sampling on different clearings in Facies Tap. From the data obtained was drawn excavated connectors rated according to the intensity of degradation and alteration of its surface. The connectors are grouped into five categories. The purpose of this inventory is to validate indices degradability of rocks obtained in the laboratory, and moreover validate the textural classification of these materials and their potential to predict their degradability and erodibility in the clearing.

Finally, characterized durability of the samples obtained using the Slake Durability Test (SDT), and otherwise, the samples have been characterized mineralogically and chemically by light microscopy thin section electron microscopy and EDS. We have also carried out a large number of other geotechnical testing to determine identification parameters, state, deformability, strength, durability and chemical components.

Key words:

Slopes, durability, soft rocks, rock degradation, classification, cementation, alteration, mineralogy, petrology, Tap Facies.

RESUM

Aquest treball sorgeix arran de converses amb enginyers i tècnics pertanyents a diferents organismes oficials i de l'observació de patologies en desmunts de carretera i ferrocarril excavats en materials de les Fàcies Tap.

Aquests desmunts experimenten processos de degradació de forma més o menys ràpida. Aquest fet té una incidència econòmica en el manteniment de la xarxa viària i també sobre la seguretat de la mateixa.

Per això, l'objectiu global de la present tesi és la caracterització de les roques toves, evolutives i argiloses, que constitueixen les Fàcies Tap del sud de la província de València i de la meitat septentrional de la província d'Alacant, prenent com a punt de partida criteris de camp i assajos habituals de laboratori, que permetin predir quin serà el comportament dels desmunts (associats a obres civils) que es construeixen en aquest material a mitjà i llarg termini.

Les roques toves, de component argilosa, variablement carbonatada, són un dels tipus més comuns de roques sedimentàries, i en la nostra geografia es presenten amb freqüència, alternant amb bancs de calcàries ben cimentades, constituint les Fàcies Tap que són d'època geològica Miocè.

Actualment no es disposa d'una classificació completa per a aquest tipus de materials, així com tampoc hi ha un assaig estàndard o criteri que avaluï el potencial de degradació d'aquests materials i el seu comportament en obra.

Així, s'ha revisat les classificacions existents i es proposa una nova classificació d'aquestes roques basada en criteris petrològic-texturals.

La nova classificació d'aquests materials presenta una millor aplicació en la caracterització geològica i geomecànica de les fàcies Tap que ajudi a predir raonablement quin serà el comportament del talús a mitjà-llarg termini, enfront dels processos superficials d'erosió i degradació.

Amb l'objecte de caracteritzar aquests materials s'han realitzat diverses campanyes de caracterització de camp i de presa de mostres, sobre diferents desmunts en Fàcies Tap.

A partir de les dades obtingudes s'ha elaborat classificació de desmunts excavats en funció de la intensitat dels processos d'alteració i degradació de la seva superfície. Els desmunts s'han agrupat en cinc categories. L'objectiu d'aquest inventari és validar els índexs de degradabilitat de les roques obtinguts en el laboratori, i per altra banda validar la classificació textural d'aquests materials i la seva potencialitat per predir la seva degradabilitat i l'erosionabilitat en els desmunts.

Finalment, s'ha caracteritzat la durabilitat de les mostres obtingudes utilitzant el *Slake Durability Test* (SDT), i per altra banda, les mostres han estat caracteritzades Mineralògicament i químicament mitjançant microscòpia òptica en làmina prima i microscòpia electrònica amb EDS. A més s'han dut a terme un nombre elevat d'altres assajos geotècnics

per determinar paràmetres d'identificació, estat, deformabilitat, resistència, durabilitat i components químics.

Paraules clau:

Desmunts, durabilitat, roques blanques, degradació de roques, classificació, cementació, alteració, mineralogia, petrologia, Fàcies Tap.

RESUMEN

Este trabajo surge a raíz de conversaciones con ingenieros y técnicos pertenecientes a distintos organismos oficiales y de la observación de patologías en desmontes de carretera y ferrocarril excavados en materiales de las Facies Tap.

Estos desmontes experimentan procesos de degradación de forma más o menos rápida. Este hecho tiene una incidencia económica en el mantenimiento de la red viaria y también sobre la seguridad de la misma.

Por ello, el objetivo global de la presente tesis es la caracterización de las rocas blandas, evolutivas y arcillosas, que constituyen las Facies Tap del sur de la provincia de Valencia y de la mitad septentrional de la provincia de Alicante, tomando como punto de partida criterios de campo y ensayos habituales de laboratorio, que permitan predecir cuál será el comportamiento de los desmontes (asociados a obras civiles) que se construyan en este material a medio y largo plazo.

Las rocas blandas, de componente arcillosa, variablemente carbonatada, son uno de los tipos más comunes de rocas sedimentarias, y en nuestra geografía se presentan con frecuencia, alternando con bancos de calizas bien cementadas, constituyendo las Facies Tap que son de época geológica Mioceno.

Actualmente no se dispone de una clasificación completa para este tipo de materiales, así como tampoco existe un ensayo estándar o criterio que evalúe el potencial de degradación de estos materiales y su comportamiento en obra.

Así, se ha revisado las clasificaciones existentes y se propone una nueva clasificación de estas rocas basada en criterios petrológico-texturales.

La nueva clasificación de estos materiales presenta una mejor aplicación en la caracterización geológica y geomecánica de las Facies Tap que ayude a predecir razonablemente cuál va a ser el comportamiento del talud a medio-largo plazo, frente a los procesos superficiales de erosión y degradación.

Con el objeto de caracterizar estos materiales se han realizado diversas campañas de caracterización de campo y de toma de muestras, sobre distintos desmontes en Facies Tap.

A partir de los datos obtenidos se ha elaborado clasificación de desmontes excavados en función de la intensidad de los procesos de alteración y degradación de su superficie. Los desmontes se han agrupado en cinco categorías. El objetivo de este inventario es validar los índices de degradabilidad de las rocas obtenidos en el laboratorio, y por otra parte validar la clasificación textural de estos materiales y su potencialidad para predecir su degradabilidad y la erosionabilidad en los desmontes.

Por último, se ha caracterizado la durabilidad de las muestras obtenidas utilizando el *Slake Durability Test* (SDT), y por otra parte, las muestras han sido caracterizadas mineralógicamente y químicamente mediante microscopía óptica en lámina delgada y microscopía electrónica con EDS. Además se han llevado a cabo un número elevado de otros ensayos geotécnicos para

determinar parámetros de identificación, estado, deformabilidad, resistencia, durabilidad y componentes químicos.

Palabras clave:

Desmontes, durabilidad, rocas blandas, degradación de rocas, clasificación, cementación, alteración, mineralogía, petrología, Facies Tap.

SUMARIO

1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Clasificaciones geológicas de las rocas arcillosas	3
2.1.1. Introducción	3
2.1.2. Clasificación de los materiales Clástico-Terriígenos	4
2.1.2.1. Generalidades	4
2.1.2.2. Clasificación de Grabau	4
2.1.2.3. Clasificación de Krynine	4
2.1.2.4. Clasificación de Gilbert y Williams	8
2.1.2.5. Clasificación de Pettijohn	9
2.1.2.6. Clasificación de Folk	11
2.1.2.7. Sistema unificado de clasificación de suelos USCS	13
2.1.3. Últimos desarrollos en la clasificación de rocas sedimentarias	20
2.1.3.1. Introducción	20
2.1.3.2. Clasificación unificada de Hallsworth y Knox	20
2.2. Antecedentes de durabilidad y del <i>Slake Durability Test</i>	33
2.2.1. Las rocas arcillosas en la Tierra	33
2.2.2. Las Facies Tap en Alicante	33
2.2.3. Problemática	33
2.2.4. Modalidades del proceso de desmoronamiento de las rocas blandas arcillosas	33
2.2.5. Ensayos utilizados para calcular la durabilidad de las rocas blandas arcillosas	34
2.2.6. La influencia de los agentes ambientales	34
2.2.7. Discusión sobre el número de ciclos necesarios	35
2.2.8. Durabilidad según el tipo de roca arcillosa	36
2.2.9. Factores que afectan a la durabilidad	36
2.2.10. Debilidades del ensayo	37
2.2.11. Sistemas de clasificación	37
2.3. Antecedentes de influencia de algunos factores en la durabilidad	39
2.4. Parámetros granulométricos relacionados con la durabilidad	42
2.4.1. Introducción	42
2.4.2. Influencia de las propiedades de las partículas en la durabilidad	45
2.5. Otros índices de durabilidad	47
2.5.1. Índice de desintegración (Erguler y Ulusay, 2009)	47
2.5.2. Índice de desintegración medio	47
2.5.3. Ratio de desintegración (Erguler y Shakoor, 2009)	48
2.6. Antecedentes de inestabilidad de laderas en rocas blandas arcillosas	51
3. Objetivos	52
4. Área de estudio	53

4.1. Situación geográfica	53
4.2. Climatología	54
4.3. Situación geológica	57
4.3.1. El relieve actual de la provincia de Alicante	57
4.3.1.1. Introducción	57
4.3.1.2. Litología	58
4.3.1.3. Tectónica	59
4.3.1.4. La evolución de la red fluvial	61
4.3.2. El Mioceno en la Comunidad Valenciana	62
4.3.3. Alicante en la Cordillera Bética	65
4.3.4. Geología de los taludes seleccionados	72
5. Metodología	79
5.1. Plan de trabajo	79
5.2. Metodología utilizada	82
5.2.1. Material de campo	82
5.2.2. Caracterización de campo y muestreo	85
5.2.2.1. Selección del Talud	85
5.2.2.2. Procedimiento de muestreo	93
5.3.2. Caracterización geotécnica de las muestras	111
5.3.2.1. Introducción	111
5.3.2.2. Ensayos de granulometría por tamizado	112
5.3.2.3. Ensayos de granulometría por sedimentación	116
5.3.2.4. Densidad relativa de las partículas	121
5.3.2.5. Límite Líquido	124
5.3.2.6. Límite Plástico	130
5.3.2.7. Límite de retracción	131
5.3.2.8. Contenido en carbonatos	135
5.3.2.9. Contenido en Materia orgánica	138
5.3.2.10. Contenido en sulfatos solubles	141
5.3.2.11. Conductividad eléctrica	143
5.3.2.12. Análisis petrográfico	145
5.3.2.12. Proctor Modificado	147
5.3.2.13. Dispersabilidad	151
5.3.2.14. Ensayo edométrico	154
5.3.2.15. Presión de hinchamiento	160
5.3.2.16. Hinchamiento libre	163
5.3.2.17. Compresión Simple	166
5.3.2.18. Corte Directo	168
5.3.2.19. <i>Slake Durability Test</i>	177
5.3.2.20. Humedad de las muestras	187
5.3.2.21. Densidad del suelo	189
5.3.2.22. Peso específico de las partículas	192
5.3.2.23. Ensayo triaxial	198
5.3.2.24. Ensayo Dusseault – Inmersión estática	207
5.3.2.25. Microscopia electrónica	210
6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos	212
6.1. Introducción	212
6.2. Clasificación geotécnica básica de los materiales de las Facies Tap	213
6.2.1. DIT14-201. Variante de Alcoy	213

6.2.2. DIT14-601. Variante de Montaberner	213
6.2.2. DIT14-1001. Variante de Benisa	213
6.3. Parámetros de identificación y clasificación de suelos	214
6.3.1. Generalidades	214
6.3.2. Granulometría	214
6.3.2.1. Introducción	214
6.3.2.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	215
6.3.2.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	216
6.3.2.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	216
6.3.3. Características plásticas	218
6.3.3.1. Introducción	218
6.3.3.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	218
6.3.3.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	219
6.3.3.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	219
6.3.4. Clasificación de suelos	219
6.3.4.1. Introducción	219
6.3.4.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	221
6.3.4.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	223
6.3.4.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	225
6.3.5. Análisis químicos	227
6.3.5.1. Introducción	227
6.3.5.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	227
6.3.5.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	228
6.3.5.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	228
6.3.6. Características de compactación y capacidad portante	229
6.3.6.1. Introducción	229
6.3.6.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	229
6.3.6.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	230
6.3.6.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	231
6.3.7. Aprovechamiento de materiales	231
6.4. Parámetros de estado en suelos	236
6.4.1. Generalidades	236
6.4.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	236
6.4.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	239
6.4.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	242
6.5. Parámetros resistentes	245
6.5.1. Generalidades	245
6.5.2. Ensayo de corte directo /triaxial	246
6.5.2.1. DIT14-201. Variante de Alcoy	246
6.5.2.2. DIT14-601. Variante de Montaberner	248
6.5.3. Ensayo de resistencia a compresión simple	249
6.5.3.1. Introducción	249
6.5.3.2. DIT14-201. Variante de Alcoy	250
6.5.3.3. DIT14-601. Variante de Montaberner	254
6.5.3.4. DIT14-1001. Variante de Benisa	257
7. Resultados obtenidos en laboratorio	260
7.1. Introducción	260
7.2. Ensayos de caracterización	261

7.2.1. Generalidades	261
7.2.2. Humedad y propiedades índice	261
7.2.3. Plasticidad – Límites de Atterberg	262
7.2.3.1. Generalidades	262
7.2.3.2. DIT14-201: Alcoy	263
7.2.3.3. DIT14-601: Montaberner	265
7.2.3.4. DIT14-1001: Benisa	267
7.2.4. Granulometría	268
7.2.4.1. Generalidades	268
7.2.4.2. Granulometría por sedimentación	268
7.2.4.3. Granulometría por tamizado	269
7.2.5. Ensayos Proctor Modificado	278
7.2.5.1. Generalidades	278
7.2.5.2. DIT14-201: Alcoy	279
7.2.5.3. DIT14-601: Montaberner	280
7.2.5.4. DIT14-1001: Benisa	281
7.2.6. Peso específico de las partículas	282
7.2.7. Materia orgánica, sulfatos y carbonatos	283
7.2.8. Conductividad eléctrica (CE/TDS)	284
7.2.9. Petrografía y microscopía	284
7.3. Ensayos de resistencia mecánica de suelos	288
7.3.1. Ensayos de compresión simple en suelos	288
7.3.1.1. DIT14-201: Alcoy	288
7.3.1.2. DIT14-601: Montaberner	293
7.3.2. Ensayos de Corte Directo	299
7.3.2.1. Generalidades	299
7.3.2.2. DIT14-201: Alcoy	300
7.3.2.3. DIT14-601: Montaberner	304
7.3.2.4. DIT14-1001: Benisa	309
7.3.3. Ensayos triaxiales	316
7.4. Ensayos de deformabilidad	321
7.4.1. Ensayos edométricos	321
7.4.2. Hinchamiento libre y presión de hinchamiento	323
7.5. Ensayos de alterabilidad	326
7.5.1. <i>Slake Durability Test</i> (SDT)	326
7.5.1.1. Generalidades	326
7.5.1.2. DIT14-201: Alcoy	327
7.5.1.3. DIT14-601: Montaberner	335
7.5.1.4. DIT14-1001: Benisa	344
7.5.2. Ensayo Dusseault	353
7.6. Ensayos de dispersabilidad	360
8. Análisis y discusión	362
8.1. Clasificación visual de los desmontes en Facies Tap en función a su comportamiento frente al desmoronamiento	362
8.2. Caracterización petrográfica y composicional de las Facies Tap	364
8.2.1. Generalidades	364
8.2.2. Clasificación petrográfica-textural de las muestras estudiadas (Facies Tap)	366

8.3. Análisis de la Durabilidad frente a los ensayos de Laboratorio	368
8.3.1. Generalidades	368
8.3.2. Influencia del agua de ensayo	369
8.3.3. Influencia de las condiciones iniciales de humedad	374
8.3.4. Influencia de la litología	376
8.3.5. Recomendaciones de utilización del Slake Durability Test en materiales de Facies Tap	377
8.4. Predicción del comportamiento en desmontes ejecutados en Facies TAP mediante el SDT	379
8.4.1. Análisis de resultados del SDT respecto a la categoría de desmonte	379
8.4.2. Valoración del SDT como predictor del comportamiento de los desmontes	380
8.5. Relación entre las características petrográficas, mineralógicas y texturales y el comportamiento de los desmontes	382
8.5.1. Introducción	382
8.5.2. La importancia del contenido en carbonato	382
8.5.3. La importancia de la porosidad	383
8.5.4. La importancia de la textura y petrografía	384
9. Conclusiones y futuras líneas de investigación	386
10. Bibliografía	389

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El propósito de este trabajo es la caracterización geotécnica, en cuanto a degradación, del dominio mioceno margoso denominado como Facies Tap que aflora en una extensa área que abarca el sur de la provincia de Valencia y la mitad septentrional de la provincia de Alicante, en la rama nororiental de la Cordillera Bética.

Las Facies Tap están conformadas por margas blancas arcillosas con porcentajes variables de arcilla y carbonatos. Esta composición hace que este material sea muy alterable a los agentes atmosféricos (Figura 1.1), sobre todo a las lluvias, debido a que el contacto del agua con este material produce la disolución de los carbonatos y, además, el consecuente aumento de la humedad junto con el posterior secado disminuyen la resistencia interna de su estructura, dando lugar al desmoronamiento.

Este aspecto es de suma importancia debido a que numerosas obras lineales discurren sobre este material y, por tanto, existen muchos desmontes de carretera y ferrocarril construidos sobre las Facies Tap vulnerables a sufrir este deterioro, produciéndose caídas de cantos y bloques (Figura 1.2), así como deslizamientos rotacionales de mayor o menor envergadura (Figura 1.3) con el consecuente incremento de peligrosidad en la circulación e incremento en los costes de reparación y mantenimiento de estas vías.



Figura 1.1. Suelo meteorizado, típico de las Facies Tap.

Todo ello nos ha motivado a realizar un estudio sobre la durabilidad y degradabilidad de los materiales de las Facies Tap, para comprender los factores que controlan el proceso de degradación y establecer criterios y métodos de caracterización que sean válidos para elaborar unos diseños más eficientes que permitan predecir su comportamiento evolutivo y mejorar la

Capítulo 1. Introducción

seguridad de la red viaria, así como minimizar los costes de mantenimiento de los desmontes de esta red excavados en rocas detritico-carbonatadas.



Figura 1.2. Caídas de cantos y bloques al pie de un desmonte ejecutado en materiales de las Facies Tap.



Figura 1.3. Deslizamiento rotacional ocurrido en un desmonte ejecutado en materiales de las Facies Tap.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 CLASIFICACIONES GEOLÓGICAS DE LAS ROCAS ARCILLOSAS

2.1.1 Introducción

Las rocas blandas arcillosas (argilita, fangolita, limolita y margas) representan más del 60% de las rocas sedimentarias que afloran en la superficie de la tierra y aproximadamente dos tercios de la columna estratigráfica (Blatt, 1982). En nuestra geografía se presentan con frecuencia alternando con estratos de areniscas y calizas (Bofill, 2013).

Las margas son rocas arcillosas, muy abundantes en la naturaleza, formadas por mezclas de caliza y arcilla. Su composición química es una combinación ponderada de las calizas y de las arcillas (o su roca madre la lutita), en todas las proporciones posibles (Morilla, 2012).

Las argilitas y limolitas son respectivamente, arcillas y limos compactados y/o cementados. Como raramente se presentan en estado puro, las rocas compuestas por fracción limo y arcilla se las denomina fangolita, que es un término poco utilizado y es traducción directa del término inglés “mudstone” (Bofill, 2013).

Existe una amplia bibliografía sobre la clasificación de rocas sedimentarias y arcillosas. El hecho de que las argilitas y limolitas, además de limo y arcilla, puedan contener arena y carbonato de calcio y de magnesio en cantidades variables, ha dado lugar a una complicada casuística que no alcanza a clasificar completa y coherentemente a las argilitas, limolitas, fangolitas y margas, teniendo en cuenta la fracción arena y cemento, ni a relacionarlas con las calizas y las areniscas, de las que sin embargo, si ha sido posible establecer una gradación. Las primeras se clasifican, en función de su contenido en caliza y arcilla, en margas o lutitas calcáreas, margas y calizas arcillosas mientras que las areniscas se clasifican en función de su contenido en arena en wackes, grauvacas, arcosas y areniscas.

La falta de consenso en la clasificación de las rocas blandas arcillosas se refleja en los mapas geológicos y en los informes geológicos-geotécnicos, donde se utilizan indistintamente los términos marga, limolita y argilita, para referirse a un mismo material.

Según Hallsworth y Knox (1999) la nomenclatura existente sobre sedimentos y rocas sedimentarias se ha desarrollado sobre un amplio rango de criterios tales como la composición mineral, la textura, y otros atributos físicos, así como el ambiente deposicional, las relaciones genéticas y la importancia económica local. Sin embargo, las diversas clasificaciones que se han venido realizando desde comienzos del siglo XX no han tenido en cuenta los materiales geológicos con los que se suelen encontrar asociados los sedimentos y las rocas sedimentarias. A su vez, se aprecia una falta de uniformidad entre la taxonomía de los sedimentos y la de las rocas madre de la que proceden.

Las rocas blandas y evolutivas contienen fracciones importantes de minerales arcillosos, lo cual dificulta aún más la consecución de un consenso y unos criterios bien establecidos en cuanto a la taxonomía de las mismas.

Capítulo 2. Antecedentes

Se ha procedido a hacer una revisión de los diferentes sistemas de clasificación existentes, con el objetivo de eliminar las incoherencias detectadas entre las clasificaciones más usuales (Pettijohn, 1980; Blatt, Middelton y Murray, 1980; Tucker 1994; Vera, 1994) y precisar el uso de los términos para evitar ambigüedades.

2.1.2 Clasificación de los materiales Clástico-Terrígenos

2.1.2.1 Generalidades

La clasificación de los materiales sedimentarios clástico-terrígenos ha sido abordada por varios autores (Pettijohn, 1957; Pettijohn et al., 1972; Sanders y Friedman, 1978; Scholle, 1979). En 2004 el USGS efectúa una revisión de los principales sistemas de clasificación, que resumimos a continuación.

2.1.2.2 Clasificación de Grabau

Grabau (1904) advirtió que el término general caliza (o limestone) era inadecuado para identificar correctamente las numerosas especies que los geólogos asignaban a este grupo. En consecuencia, clasificó estos carbonatos genéticamente en tres grupos: hidroclásticos, bioclásticos y biogénicos u orgánicos. La mayoría de los investigadores posteriores a Grabau han estado de acuerdo en que la composición (o mineralogía) y la textura son parámetros muy significantes (Bissell y Chilingar, 1967).

A su vez Grabau (1904) entendió que una única variable, como el tamaño de partícula o la composición, era insuficiente para clasificar una roca sedimentaria satisfactoriamente (Friedman, 1992), y concluyó que ambos factores debían de ser considerados. Así, abandonó los términos que hasta ahora se habían utilizado, referidos al tamaño de partícula; grava, arena y arcilla e introdujo los términos latinos rudita, arenita y lutita, refiriéndose la terminación -ita a una roca. Por otra parte, Grabau se referiría a la composición de la roca con los siguientes prefijos: calc-, argil- y silic-, de forma que, por ejemplo, una arenisca constituida por partículas de cuarzo se denominaría silicarenita.

2.1.2.3 Clasificación de Krynine

La composición mineralógica inicial de los suelos, en teoría, es la misma que la de la roca madre, pero en el proceso de formación de los suelos, intervienen fenómenos de alteración que modifican los componentes, reduciendo el porcentaje de los minerales más alterables y aumentando el de los menos meteorizables (Morilla, 2012).

Así por ejemplo en arenas procedentes de alteración de granitos, estarán presentes, el cuarzo, el feldespato y la mica de la roca madre, pero a medida que vaya pasando el tiempo (en escala geológica) los porcentajes relativos de la sílice aumentarán y los de feldespato y mica, más

Capítulo 2. Antecedentes

alterables, disminuirán, pudiendo darse el caso, en zonas sometidas a gran erosión y arrastres hidráulicos, que el componente único de las arenas sea el cuarzo.

Una clasificación general de los sedimentos, que formarán las rocas y por meteorización de éstas, los suelos correspondientes, se indica en la Tabla 2.1.1. Dicha clasificación es debida a Krynine (1945).

CLASIFICACIÓN GENERALIZADA DE LOS SEDIMENTOS (SEGÚN KRYNINE, 1945)					
Composición		Cuarzo ± Ftanita	Cuarzo + Ftanita + Mica + Clorita		Cuarzo + Feldespato ± Arcilla
			- Feldespato	+ Feldespato	
Textura		Conglomerado de cuarzo	Conglomerado de grauvasca		Conglomerado arcósico
Rocas detríticas (textura clásica)	Conglomerados gruesos		Bajo grado	Alto grado	
	Areniscas medianas	Grauvasca		Arcosa	
	Lutitas finas	Bajo grado	Alto grado		
	Lutitas finas	Lutita cuarzosa	Lutita micácea	Lutita clorítica	Lutita caolinítica y deldespática
Rocas químicas	Arenoso (elástico) Puro (cristalino)	Caliza, Dolomía, Ftanita, Sal, Yeso, etc.			

Tabla 2.1.1. Clasificación de Krynine (1945). Tomado de Morilla, 2012.

Krynine fue el primer petrógrafo de sedimentos en establecer una nomenclatura y clasificación de las areniscas (*sandstones*). El artículo original de Krynine (1948) es un clásico en la geología; combina la astuta observación de las muestra en el campo con una profunda percepción y apreciación de los principios fundamentales de la geología. La contribución de Krynine ha sido considerada por la gran mayoría de los autores posteriores, hasta el día de hoy (Friedman, 1992). En su clasificación de las areniscas, Krynine introdujo diagramas ternarios para situar las areniscas en uno de los siguientes grupos: ortocuarcita, grauvasca, y arcosa (Figura 2.1.1).

El uso de los términos grauvasca y arcosa puede llevar a confusión. La primera descripción de la grauvasca data de 1789, y el término arcosa se introdujo en 1823. La historia de ambos términos ha sido revisada incluso antes de que Krynine las incluyera en su clasificación. Krynine describe la grauvasca como una arenisca compuesta por partículas de cuarzo angular (y sílex) y abundantes fragmentos de roca metamórfica, en algunos casos, con un bajo contenido en cemento y feldespato, y que contiene entre un 12 y un 17% de mica y clorita (ambos formando parte de la matriz arcillosa o como fragmentos de roca metamórfica). Krynine consideró que la mica y la clorita formaban una matriz que había sido depositada mecánicamente y que se encontraba pobremente ordenada. Hoy en día esta idea ya no puede ser asumida. Cuando las partículas que forman el entramado están enterradas a gran profundidad y sujetas a los adecuados gradientes geotérmicos y, a través de dichos suelos, circula algún tipo de solución,

Capítulo 2. Antecedentes

Partículas de tamaño arena	Nombre de la roca en función de las partículas tamaño arena	
	< 15 % matriz	>15 % matriz
Cuarzo	Cuarciarenita	Arenita cuarzo-arcillosa
Feldespatos	Arenita feldespática	Arenita feldespato-arcillosa
Fragmentos de roca	Arenita lítica	Arenita lítico-arcillosa

Tabla 2.1.2. Clasificación y denominación de las areniscas o arenitas. Friedman *et al.*, (1992).

Por último, Krynine (1948) desarrolló un esquema de campo (Bofill, 2013) que se muestra en la Figura 2.1.3, del que destacamos que:

- La clasificación reconoce la importancia de las relaciones entre los tamaños de grano como punto de partida en la taxonomía clástico-terrágena.
- La aproximación de Krynine establece las bases de una clasificación de tipo jerárquica para los materiales clástico-terrágenos.
- Aunque establece porcentajes concretos para categorías como arenisca con cantos (pebble sandstone) o arenisca conglomerática (*conglomeratic sandstone*), Krynine no especificó los límites entre las categorías principales: conglomerados (*conglomerates*), areniscas (*sandstones*), y finos (*fine clastics*), dejando sin resolver la naturaleza de estos importantes límites taxonómicos.

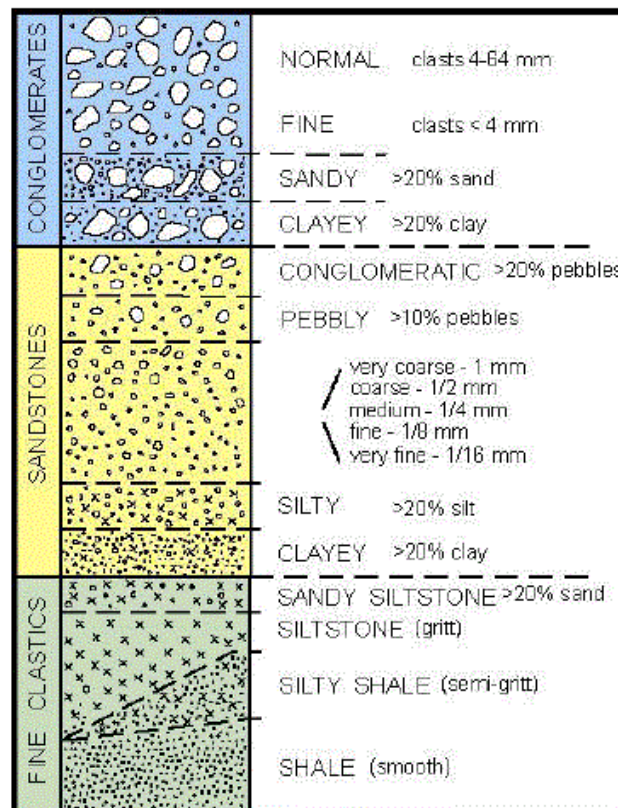


Figura 2.1.2. Clasificación de los materiales sedimentarios terrígenos (Krynine, 1948). Tomado de Bofill (2013).

2.1.2.4 Clasificación de Gilbert y Williams

Gilbert (citado en Williams *et al.*, 1954) estableció unos sencillos criterios, pero a su vez poco específicos para establecer los límites entre distintos tipos de rocas sedimentarias, basándose únicamente en su granulometría.

Por su parte, Williams *et al.* (1982) realizaron una revisión de esta taxonomía, ampliando el campo de las areniscas.

Los criterios de ambos autores se resumen en la Tabla 2.1.4.

Denominación de la roca	Gilbert (citado en Williams <i>et al.</i> , 1954)	Williams <i>et al.</i> , 1982
Conglomerado	> 25 % de los granos mayores que la arena y el conjunto sin consolidar son gravas	> 50 % corresponde a cantos (pebbles y cobbles)
Arenisca conglomerática (conglomeratic sandstone)	Sólo se encuentran unos pocos granos gruesos	
Arenisca		Predominio fracción tamaño arena (> 50 %)
Lutita guijarrosa	> 50 – 60 %de partículas tamaño arcilla y presencia de partículas gruesas	
Lutita	> 50 – 60 %de partículas tamaño arcilla	

Tabla 2.1.3. Criterios de clasificación de rocas sedimentarias de Gilbert y Williams, en Williams *et al.* (1982).

La Figura 2.1.4 de Williams *et al.* (1982) muestra un diagrama ternario que clasifica las rocas sedimentarias en cinco tipos: conglomerado, lutita conglomerática, arenisca conglomerática, lutita guijarrosa y arenisca guijarrosa, en función de sus porcentajes en peso de partículas tamaño grava, tamaño arena y de tamaño lodo (limos y arcillas).

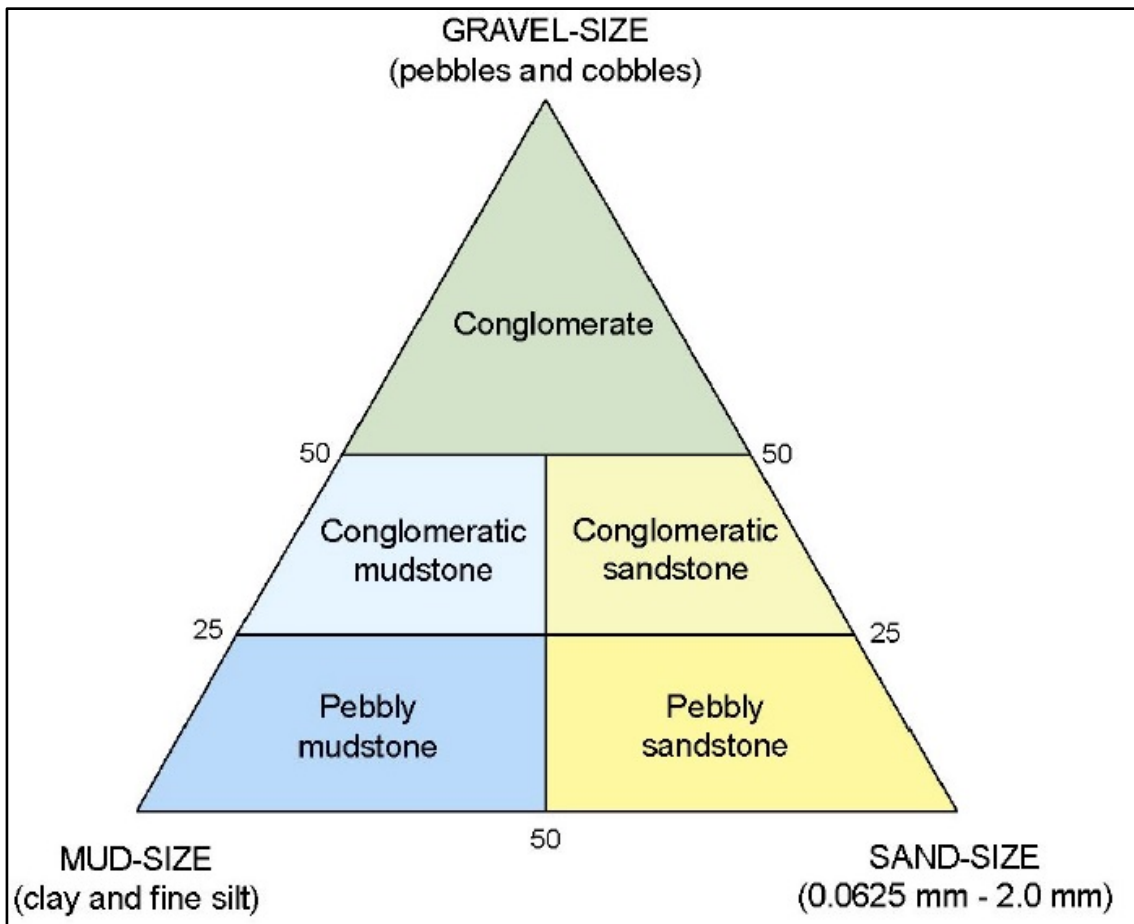


Figura 2.1.3. Clasificación de las rocas sedimentarias (Williams et al., 1982). Tomado de USGS (2004).

2.1.2.5 Clasificación de Pettijohn

La clasificación de Pettijohn de las areniscas combina criterios texturales, la proporción de la matriz lodosa, con criterios composicionales, los porcentajes de los tres componentes más comunes de las areniscas: cuarzo, feldespato y fragmentos líticos. El diagrama triangular (Figura 2.1.4) incluye estos tres elementos en sus vértices formando un triángulo muy utilizado en sedimentología clástica.

El primer paso para utilizar este esquema de clasificación de las areniscas, las proporciones relativas de cuarzo, feldespato y fragmentos líticos debe determinarse mediante estimación visual o mediante conteo de los granos en microscopio: otros componentes, como la mica o fragmentos biogénicos, no están considerados en este esquema. La tercera dimensión del diagrama de clasificación se utiliza para fijar la textura de la roca, las proporciones relativas de clastos y de la matriz. En una arenisca la matriz la forman el limo y la arcilla que ha sido depositado con las partículas de arena. El segundo paso es, por lo tanto, medir o estimar la cantidad de matriz lodosa: si la cantidad de matriz presente es menor que el 15% la roca se clasifica como una arenita, entre el 15% y el 75% como wacka y si la mayor parte del volumen de la roca está ocupado por la matriz de grano fino se clasifica como fangolita o "mudstone" (Nichlos, 2009).

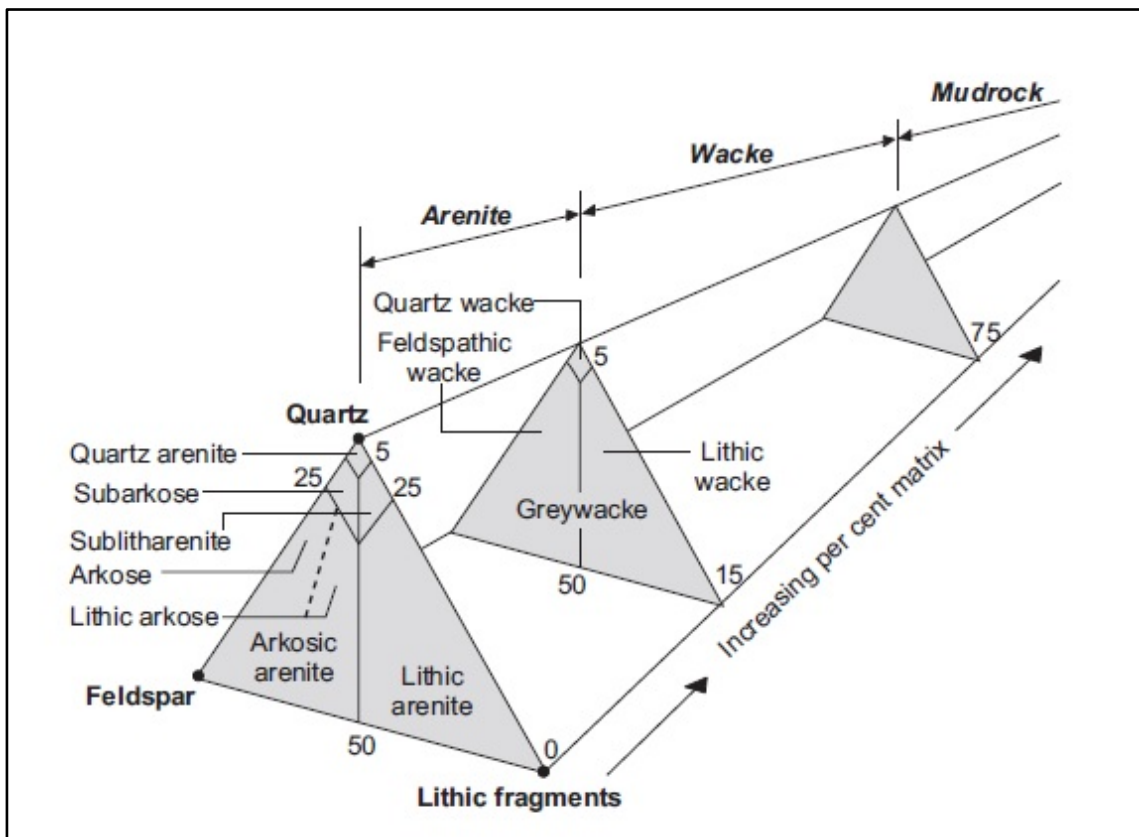


Figura 2.1.4. Clasificación de Pettijohn de las areniscas (Pettijohn 1975).

El cuarzo es el tipo de grano más común en la mayoría de las areniscas y, por ese motivo, la clasificación enfatiza en la presencia de otros granos. Tan sólo es necesario que el feldespato se encuentre en una proporción del 25% en la roca, para que a este se le denomine arenita feldespática, arenita arcósica o arcosa (estos tres términos son intercambiables al referirse a una arenisca rica en granos de feldespato). De la misma forma, una arenita lítica será aquella que contenga un 25% de fragmentos líticos. Aproximadamente un 95% de cuarzo debe estar presente en una roca para que se le clasifique como cuarzo-arenita; las areniscas con porcentajes de feldspatos o granos líticos intermedios se denominan arenitas subarcósica y arenita sublítica. Los wackes se clasifican de forma similar en wacke cuarzoso, wacke feldespático o arcosos y wacke lítico, pero sin subdivisión. Si exista la presencia de un tipo de grano distinto a los tres componentes principales en cantidades significantes (al menos un 5% o 10%), se debe utilizar un prefijo como por ejemplo “arenita cuarzosa micácea: nótese que en este caso, la roca no necesariamente debe contener un 95% de cuarzo respecto a todos los granos presentes, pero sí un 95% sobre las cantidades de cuarzo, feldespato y fragmentos líticos, cuando estos se encuentran juntos en una roca.

El término grauvasca ha sido utilizado por anteriores autores para definir una arenisca que debería también denominarse como *wacke* feldespático o lítico. Estas son mezclas típicas de fragmentos de roca, granos de feldespato y cuarzo con una matriz limo-arcillosa.

2.1.2.5 Clasificación de Folk

Folk (1959) subdividió los constituyentes de las calizas en dos categorías: (1) constituyentes aloquímicos (*allochems*), es decir, partículas de tamaño arena o mayores, y (2) constituyentes ortoquímicos (*orthochems*), que consisten en micrita, presumiblemente lodo calizo litificado y cemento en forma de calcita espática, tal y como se observa en la Figura 2.1.5. La clasificación de Folk, la cual ha sido ligeramente modificada, enumera cuatro tipos de alóquemos (partículas de tamaño arena o mayores): (1) intraclastos (*grapestones* incluidos), (2) ooides (incluyendo otros tipos de partículas similares), (3) debris esqueléticos (fósiles o fragmentos de fósiles), y (4) perdigones (*pellet*), incluyendo a los peloides.

Los intersticios entre los alóquemos están ocupados por los constituyentes ortoquímicos (micrita o cemento de calcita espática). Las diferentes combinaciones de alóquemos y ortoquemos son el fundamento en que se basa el reconocimiento de ocho tipos de calizas. Además, la micrita puede carecer de partículas de tamaño arena y, por consiguiente, conformar el noveno tipo de caliza. Finalmente, la roca de arrecife (biolitita) conforma la décima clase de calizas (Friedman, 1992).

Folk (1959) asignó los nombres a ocho de estas diez clases de calizas utilizando palabras compuestas consistentes en dos partes: (a) inicialmente, una primera expresión abreviada para el alóquemo, y (b) una palabra designando el constituyente ortoquímico, basado en uno de los dos grupos anteriormente mencionados. Estas palabras son, para los ortoquemos, (1) micrita (carbonato microcristalino, presumiblemente lodo calizo o lodo calizo litificado), y (2) esparita (calizas cuyo cemento consiste en calcita espática). Los prefijos para los alóquemos se abrevian de la siguiente forma:

Intraclastos = intra

Ooides = oo

Fósiles = bio

Pellets (perdigón) = pel

Por lo tanto, los nombres de estas ocho clases de calizas son intraesparita, intramicrita, oosparita, oomicrita, bioesparita, biomicrita, pelsparita, y pelmicrita. Si varias clases de partículas son constituyentes importantes de una caliza, sus abreviaciones se escriben en orden de menor a mayor abundancia. Por ejemplo, una caliza con constituyentes ortoquímicos que cae en la categoría de micrita y tiene alóquemos compuestos de un 10 % de intraclastos, 20% de debris esquelético, y 70% de peloides se denominaría intrabiopelmicrita. Si una caliza oolítica contiene tanto micrita como espátos entre sus constituyentes ortoquímicos, siendo la micrita la menos abundante, entonces el nombre de la roca sería oomiquesparita. Si se compara una mezcla de tres componentes en la cual la esparita es el constituyente ortoquímico en menor abundancia, el nombre de la roca sería oosparmicrita.

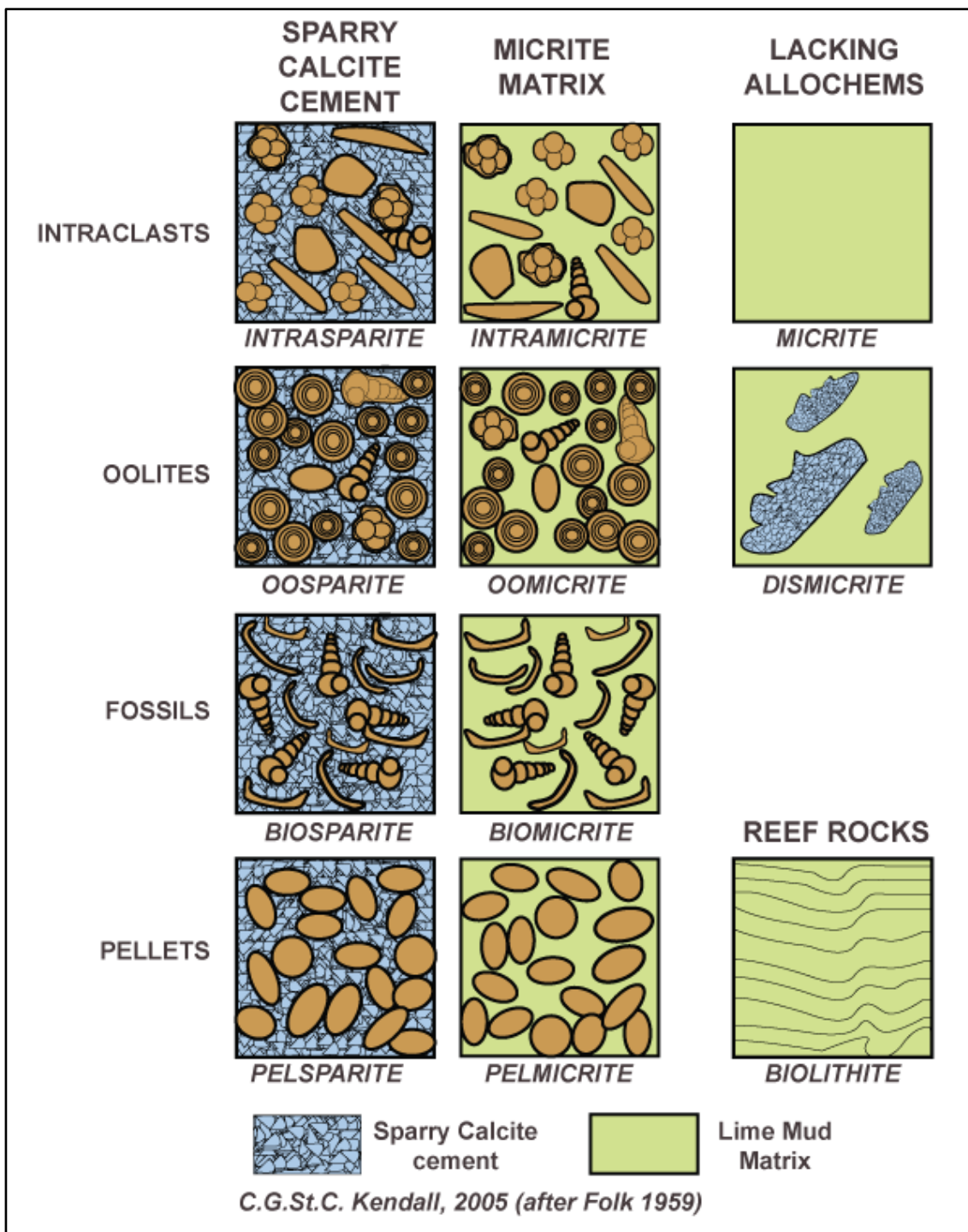


Figura 2.1.5. Clasificación de las calizas de acuerdo con el esquema de Folk (1959).

La clasificación de Folk considera también a las partículas de tamaño mayor que el de la arena, las cuales, sin embargo, no son particularmente comunes en las calizas. Para guijarros (*pebbles*), tales como los intraclastos de conglomerados de guijarros planos (*flat-pebble conglomerates*) o los perdigones más o menos grandes (*pellets*) provenientes de organismos, Folk mantuvo la tradición de uno de los términos utilizados por Grabau (1904), rudita. Una caliza compuesta de grandes perdigones o guijarros que se acumulan en una micrita, se

Capítulo 2. Antecedentes

conoce como pelmicrudita; si nos referimos a una caliza en cuya matriz de micrita se embeben perdigones planos en una micrita sería intramicrudita. Si el cemento espático está entre estos mismos guijarros, las calizas se designarían como pelesparrudita e intrasparrudita.

El aspecto más distintivo de la clasificación de Folk es el uso de nombres para definir las ocho clases mayores de calizas basándose en el material depositado entre las partículas (espato o micrita). Cuando esta clasificación fue introducida por primera vez, muchos geólogos discreparon con ella debido a que les parecía extraña la propuesta de crear nuevos nombres. Otros opinaban que muchas de las distinciones que Folk propone en su clasificación eran difíciles de reconocer en el campo. Sin embargo, con el tiempo se ha demostrado que la clasificación de Folk es práctica y lógica a su vez.

2.1.2.7 Sistema unificado de clasificación de suelos USCS

Introducción

El *Unified Soil Classification System*, USCS, fue formulado por Casagrande como una modificación y adaptación más general de su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos (Garrido *et al.*, 2012).

El procedimiento fue posteriormente modificado (1952) por el mismo autor y el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos, quienes hicieron que fuera más aplicable a los propósitos ingenieriles.

Actualmente cuenta con amplia aceptación y es el más utilizado por la mayor parte de los ingenieros civiles en todo el mundo, siguiendo la norma ASTM D 2487: *Unified Soil Classification System*.

El sistema USCS utiliza los siguientes criterios de clasificación:

- Distribución del tamaño de partículas → granulometría por tamizado.
- Límites de consistencia → límite líquido e índice de plasticidad, que se introducen en la Carta de Plasticidad, ideada por Casagrande (1932) en base a investigaciones realizadas en laboratorio.
- Contenido en materia orgánica y como ésta interacciona con la fase líquida del suelo y el resto de partículas sólidas.

Esta clasificación divide los suelos en cuatro grandes categorías: suelos de grano fino, suelos de grano grueso, turbas y suelos orgánicos.

Su objetivo es establecer un lenguaje común y relacionar propiedades con determinados grupos de suelos, considerando el suelo como material de construcción.

Existen otros sistemas de clasificación de suelos de aplicación en obra civil, como el sistema AASTHO, *American Association of State Highway Officials*, o el BS, Sistema Británico.

Capítulo 2. Antecedentes

Procedimiento

Se designa el suelo mediante letras que hacen referencia a las iniciales de sus nombres en inglés:

1. PREFIJO: Grupo principal al que pertenece el suelo.

Tipo de suelo	Prefijo
Grava (Gravel)	G
Arena (Sand)	S
Limo (Mud)	M
Arcilla (Clay)	C
Orgánico (Organic)	O
Suelos altamente orgánicos/Turbas (Peat)	P _t

Tabla 2.1.3. Grupos principales de suelos. Casagrande (1952).

2. SUFIJO: Subdivisiones dentro de los grupos principales.

Subdivisiones de grupos	Sufijo
Alta plasticidad (High plasticity)	H
Baja plasticidad (Low plasticity)	L
Bien graduada (Well graded)	W
Mal graduada (Poorly graded)	P

Tabla 2.1.4. Subdivisiones de los grupos principales. Casagrande (1952).

El código que se adjudica a cada suelo constará de un prefijo y uno o dos sufijos. Las combinaciones posibles son:

- Los sufijos H y L únicamente pueden acompañar a los prefijos M, C y O.
- Los sufijos W y P únicamente pueden acompañar a los prefijos S y G.
- Los prefijos M y C pueden actuar de sufijos con los prefijos S y M.

Clasificación preliminar

En primer lugar se realiza una clasificación preliminar. Para determinar si el terreno es una turba se realizan una serie de pruebas organolépticas:

- Presencia de tejidos vegetales o restos animales.
- Presencia de coloraciones marrones oscuras, grises, negras y olor orgánico.
- Consistencia esponjosa.
- Textura fibrosa o amorfa.

Si se da una o varias de estas características, se trata de un suelo altamente orgánico, P_t, en caso contrario se descarta esta posibilidad y se continúa con la clasificación.

Capítulo 2. Antecedentes

En este último caso, el siguiente paso consiste en determinar si se trata de un suelo de grano grueso - mayoritariamente constituido de partículas de tamaño grava y/o arena – o de grano fino – mayoritariamente constituido de partículas de tamaño limo y/o arcilla -.

Para continuar con el empleo de este sistema de clasificación es necesario distinguir los siguientes conceptos:

- *FF*: porcentaje de la muestra total de suelo que pasa por el tamiz 0.08 mm UNE, es decir, cantidad de fracción fina (limos + arcillas) que contiene el suelo.
- *FG*: porcentaje de la muestra total de suelo que queda retenido en el tamiz 0.08 mm UNE, es decir, cantidad de fracción gruesa (gravas + arenas) que contiene el suelo.
- *S*: porcentaje de la fracción gruesa que pasa por el tamiz 5 mm UNE.
- *G*: porcentaje de la fracción gruesa que queda retenido en el tamiz 5 mm UNE.
- W_L : límite líquido.
- *IP*: Índice de plasticidad del suelo obtenido como diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

En algunos suelos puede distinguirse visualmente a que fracción pertenece, por ejemplo, la arena de duna pertenece a la fracción gruesa y la arcilla extraída en una cantera pertenece a la fracción fina.

Pero en la mayoría de los casos los suelos son mezclas tan heterogéneas que es difícil determinar a simple vista la fracción mayoritaria. En estos casos la distinción se realiza haciendo pasar una muestra del mismo a través del tamiz 0.080 mm UNE (# nº 200 ASTM):

- Si el 50 % o más del peso del suelo seco pasa por el tamiz 0.080 mm UNE, se trata de un suelo de grano fino.
- Si menos del 50 % del peso del suelo seco pasa por el tamiz 0.080 mm UNE, se trata de un suelo de grano grueso.

A continuación se describe cómo se clasifican cada uno de estos dos grandes grupos utilizando el sistema USCS.

Suelo de grano fino

Cuando el 50 % o más de las partículas de un suelo tiene un tamaño inferior a 0.080 mm (% Pasa 0.080 \geq 50 % Muestra Total), éste se clasifica con un suelo de grano fino.

El criterio que utiliza el sistema USCS para la clasificación de suelos finos es el de los límites de Atterberg, luego para poder emplear este sistema es necesario conocer el Límite Líquido y el Índice de plasticidad del suelo y su posición en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

La Carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 2.1.6) es una gráfica donde se representa el límite líquido en el eje de abscisas y el índice de plasticidad en el eje de ordenadas a escala natural.

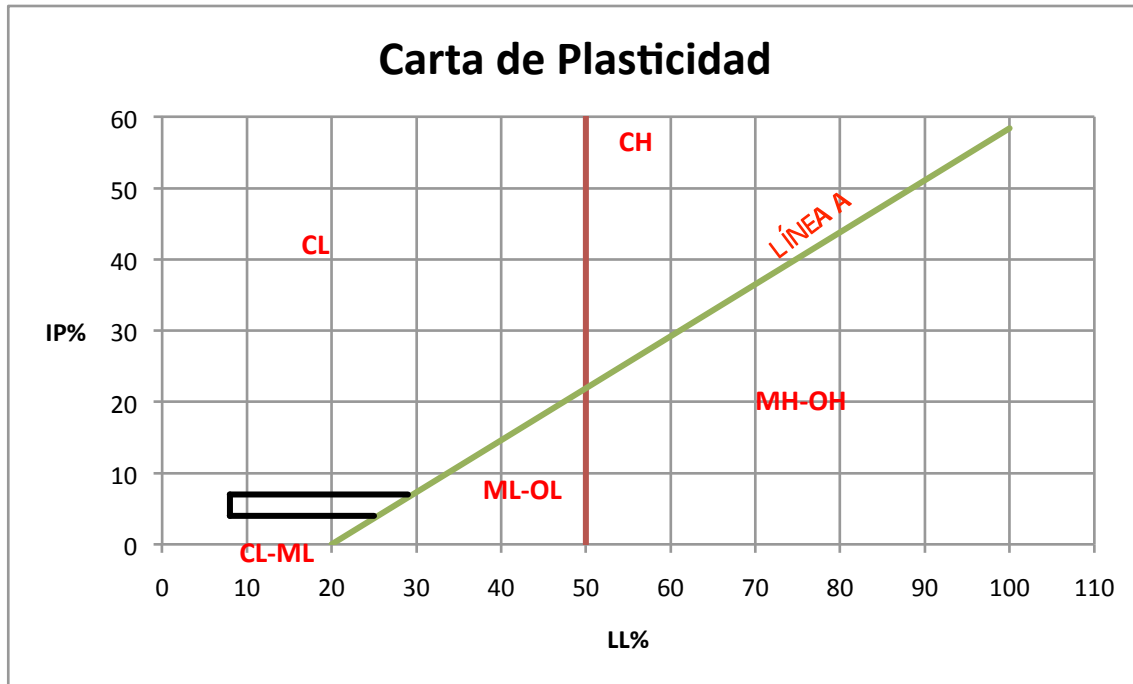


Figura 2.1.6. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Como se puede comprobar la Carta de Plasticidad está dividida en cinco zonas, a cada una de estas zonas le corresponde un código distinto según el sistema USCS, es decir, un símbolo formado por un prefijo más un sufijo concretos, lo que representa un tipo de suelo de grano fino.

De manera que para clasificar el suelo se representa en la Carta el punto (Límite líquido, Índice de plasticidad) y se le adjudica el código de la zona donde se ubique el punto.

Las divisiones de la Carta de Plasticidad son:

- El valor de límite líquido igual a 50 (línea roja) divide la gráfica verticalmente en dos. Los suelos que se sitúan a la derecha serán suelos de alta plasticidad, H, y los situados a la izquierda serán suelos de baja plasticidad, L.
- La línea A (línea verde) divide la gráfica en diagonal. Los suelos que se sitúan sobre esta línea son suelos arcillosos, C, y los situados bajo la línea son suelos limosos, M. La ecuación de la línea A es: $IP=0.73 \cdot (WL-20)$.
- Sobre la línea A y entre los valores de índice de plasticidad de 4 y 7 (líneas negras) se localiza la quinta zona de la gráfica, área sombreada donde se sitúan los suelos denominados arcillas limosas de baja plasticidad.
- Cuando $W_L > 110$ o $IP > 60$, la gráfica de plasticidad se amplía con la misma escala en ambos ejes y extendiendo la línea A con la misma pendiente.

Con todo esto los suelos de grano fino se pueden clasificar como:

- CH: Arcilla de alta plasticidad.
 - o A la derecha del $W_L = 50$ y por encima de la Línea A.

Capítulo 2. Antecedentes

- CL: Arcilla de baja plasticidad.
 - A la izquierda del $W_L = 50$, por encima de la Línea A y por encima del valor de $IP = 7$.
- CL-ML: Arcilla limosa de baja plasticidad.
 - Por encima de la línea A y con índice de plasticidad entre 4 y 7.
- MH: Limo de alta plasticidad.
 - A la derecha del $W_L = 50$ y bajo la Línea A.
- ML: Limo de baja plasticidad
 - A la izquierda del $W_L = 50$ y bajo la Línea A.

Estos cinco tipos de suelos son suelos inorgánicos. Existen dos suelos de grano fino más que son de naturaleza orgánica:

- OH: Suelo orgánico de alta plasticidad.
 - A la derecha del $W_L = 50$ y bajo la Línea A.
- OL: Suelo orgánico de baja plasticidad.
 - A la izquierda del $W_L = 50$ y bajo la Línea A.

A su vez cualquiera de ellos puede ser arcilla o limo según esté situado sobre o bajo la línea A:

- Arcilla Orgánica. Es una arcilla con suficiente contenido de materia orgánica como para influir en las propiedades del suelo. Para su clasificación, una arcilla orgánica es un suelo que es clasificado como arcilla, excepto que el valor de su límite líquido después de secado en el horno es menor que el 75 % de este valor antes de ser secado.
- Limo Orgánico. Es un limo con suficiente contenido de materia orgánica como para influir en las propiedades del suelo. Para su clasificación, un limo orgánico es un suelo que es clasificado como limo, excepto que el valor de su límite líquido después de secado en el horno es menor que el 75 % de este valor antes de ser secado.

Para describir el suelo de grano fino, una vez obtenido el código según el sistema USCS, se define este código y se le añade una expresión en función del porcentaje de fracción gruesa que contenga:

- Si el porcentaje de fracción gruesa (arena + grava) que contiene el suelo está entre 15 y 30 % se añade al nombre del grupo "con arena" o "con grava" (según predomine la arena o la grava). Si el porcentaje de arena es igual al de grava, se usa "con arena".
- Si el porcentaje de fracción gruesa que contiene el suelo es mayor a 30 % se añade al nombre del grupo "arenosa" o "gravosa" (según predomine la arena o la grava).

Suelo de grano grueso

Cuando menos del 50 % de las partículas de un suelo tiene tamaño inferior a 0.080 mm (% Pasa 0.080 < 50 % Muestra Total), éste se clasifica como un suelo de grano grueso.

Capítulo 2. Antecedentes

El criterio que utiliza el sistema USCS para la clasificación de suelo de grano grueso es en primer término la granulometría de la fracción gruesa y en segundo término los límites de Atterberg de la fracción fina.

El esquema a seguir es, en primer lugar determinar el prefijo en función de la distribución de la fracción gruesa y en segundo lugar determinar el sufijo en función de la cantidad de fracción fina que tiene el suelo.

La primera fase en la clasificación de un suelo de grano grueso es la determinación del prefijo y consiste en distinguir si la fracción gruesa es mayoritariamente arena o grava para lo que se ha determinado previamente:

- S: porcentaje de la fracción gruesa que pasa por el tamiz 5 mm UNE.
- G: porcentaje de la fracción gruesa que queda retenido en el tamiz 5 mm UNE.

Con estos datos:

- Si $S \geq G$ el nombre del grupo (prefijo) será S.
- Si $G \geq S$ el nombre del grupo (prefijo) será G.

La segunda fase es la determinación del sufijo: conocido el valor del porcentaje de la fracción fina con respecto al total de la muestra, FF , pueden darse tres casos distintos: que el porcentaje de fracción fina sea inferior al % del total de la muestra, que el porcentaje de fracción fina este comprendido entre el 5 y el 12 % del total de la muestra y que el porcentaje de fracción fina sea mayor que el 12 % del total de la muestra.

A continuación se explica cómo se determina el sufijo, y en base a qué criterios, en cada uno de estos tres casos.

• Caso 1: $FF < 5\%$ Muestra total. Para determinar el sufijo es necesario calcular los siguientes valores:

- Coeficiente de uniformidad $\rightarrow C_u = D_{60}/D_{10}$
- Coeficiente de curvatura $\rightarrow C_c = (D_{30}^2)/(D_{10} \cdot D_{60})$

donde D_{10} , D_{30} y D_{60} son los diámetros correspondientes al 10 %, 30 % y 60 % del suelo, respectivamente.

Si el prefijo es S, el sufijo puede ser:

- W si $C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3 \rightarrow SW$
- P si $C_u < 6$ y/o C_c no pertenece al intervalo [1, 3] $\rightarrow SP$

Si el prefijo es G, el sufijo puede ser:

- W si $C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3 \rightarrow GW$
- P si $C_u < 4$ y/o C_c no pertenece al intervalo [1, 3] $\rightarrow GP$

• Caso 2: $5 \leq FF \leq 12\%$ Muestra total. En este caso el código del suelo constará de un prefijo y dos sufijos.

Capítulo 2. Antecedentes

Para determinar el primer sufijo se utiliza el criterio de granulometría mediante el cálculo de los coeficientes de uniformidad y curvatura tal y como se ha hecho en el caso anterior:

Si el prefijo es S, el sufijo puede ser:

- W si $C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3 \rightarrow SW$
- P si $C_u < 6$ y/o C_c no pertenece al intervalo $[1, 3] \rightarrow SP$

Si el prefijo es G, el sufijo puede ser:

- W si $C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3 \rightarrow GW$
- P si $C_u < 4$ y/o C_c no pertenece al intervalo $[1, 3] \rightarrow GP$

Para determinar el segundo sufijo se utiliza el criterio de consistencia mediante la representación gráfica en la Carta de Plasticidad del punto (límite líquido, índice de plasticidad).

Pueden darse las tres siguientes situaciones distintas:

- C si el punto recae sobre la línea A $\rightarrow SC$ o GC
- C si el punto recae en el recuadro negro $\rightarrow SC$ o GC
- M si el punto recae bajo la línea A $\rightarrow SM$ o GM

Por tanto, en este caso tendremos los siguientes códigos:

Para arenas: SW-SC, SP-SC, SW-SM y SP-SM.

Para gravas: GW-GC, GP-GC, GW-GM y GP-GM.

• Caso 3: $FF > 12\%$ Muestra total. Para determinar el sufijo se utiliza el criterio de los límites de consistencia, tal y como se determina el segundo sufijo del caso anterior. De este modo una vez representado, en la Carta de Plasticidad, el punto (límite líquido, índice de plasticidad) se pueden dar las tres siguientes situaciones.

- C si el punto recae sobre la línea A $\rightarrow SC$ o GC
- C y M si el punto recae en la zona sombreada $\rightarrow SC-SM$ o $GC-GM$
- M si el punto recae bajo la línea A $\rightarrow SM$ o GM

Para describir el suelo de grano grueso, una vez obtenido el código según el sistema USCS, se define este código y se le añade una expresión en función del porcentaje del otro componente de la fracción gruesa que contenga:

- Si el suelo es mayoritariamente arena pero contiene el 15 % o más de grava se añade a la descripción de la expresión "con grava".
- Si el suelo es mayoritariamente grava pero contiene el 15 % o más de arena se añade a la descripción la expresión con arena.
- Si la muestra contiene bloques, es decir, fragmentos de roca retenidos en el tamiz 80 mm UNE O 3" ASTM, se añade a la descripción la expresión "con bloques".

2.1.3 Últimos desarrollos en la clasificación de rocas sedimentarias

2.1.3.1 Introducción

Los diferentes tipos de sedimentos y rocas sedimentarias aparecen en la superficie de la tierra como un continuo, de forma que no existen unos claros límites entre ellas. Sin embargo, ciertos tipos de grupos de sedimentos y de rocas sedimentarias se agrupan entre ellas de forma natural. Estos grupos que conforman, han sido clasificados separadamente por diferentes autores que no han tenido en cuenta en sus clasificaciones a los materiales adyacentes con los cuales se solapan. Por ejemplo, las areniscas, las calizas y las arcillas ferruginosas han sido todas ellas clasificadas de forma separada pese a que en la naturaleza se solapan, tanto en su composición como en su localización. Además los límites que se han establecido respecto a la composición de los sedimentos litificados han sido distintos a los utilizados para clasificar sus equivalentes no litificados. Una clasificación consistente y fácil de utilizar necesita que estos límites queden claramente establecidos y unificados (Hallsworth y Knox, 1999).

2.1.3.2 Clasificación unificada de Hallsworth y Knox

Generalidades

La clasificación unificada de Hallsworth y Knox (1999) tiene como objetivo establecer una nomenclatura bien definida y sin ambigüedad de los sedimentos litificados y no litificados de una manera lógica sistemática y jerárquica. Hasta ahora las clasificaciones que diversos autores habían realizado de las rocas sedimentarias se habían basado en criterios tales como la composición, la textura, el ambiente deposicional, las relaciones genéticas y la importancia económica local. Como resultado de esto, la terminología de los sedimentos y las rocas sedimentarias tiende a ser inconsistente y, en algunos casos, insuficiente a la hora de clasificar y denominar una determinada roca sedimentaria.

Los principales motivos que indujeron a Hallsworth y Knox a estandarizar los procedimientos de clasificación y nomenclatura de los sedimentos son los siguientes:

- (i) Asegurar que todos los geólogos utilizan el mismo procedimiento para clasificar y denominar a los sedimentos y a las rocas sedimentarias, de modo que se reduzcan las fuentes de confusión potenciales y malentendidos sobre el significado de los nombres de una roca en particular.
- (ii) Construir una nomenclatura más descriptiva de los sedimentos y de las rocas sedimentarias, de modo que las denominaciones de las mismas aporten una mayor información tanto para especialistas como para aquellos que se estén iniciando en la materia y permitan fácilmente situar cualquier sedimento en su posición dentro de su jerarquía.
- (iii) Desarrollar un esquema de clasificación que unifique los límites con respecto a la composición de los sedimentos litificados y no litificados.
- (iv) Producir un esquema de clasificación jerárquica y una aproximación lógica a la nomenclatura de los sedimentos. Un esquema de clasificación de sedimentos con

Capítulo 2. Antecedentes

una estructura jerárquica tiene tres beneficios fundamentales. El primero es que es un sistema fácil de utilizar, en el que un amplio rango de tipos de sedimentos se dividen y clasifican de una manera lógica. El segundo es que puede servir como orientación de como clasificar y denominar sedimentos en función del nivel de información de la que el usuario disponga – cuanta más información se disponga, mayor será el nivel de jerarquía en el que la roca puede ser clasificada y denominada. El tercero, es que es un sistema muy apropiado para introducir, almacenar y recuperar datos en una base de datos informática.

Este esquema está diseñado principalmente para clasificar y denominar sedimentos, y es esencialmente descriptivo. Se excluye en este sistema toda nomenclatura que tenga significados o connotaciones genéticas, así como aquella más apropiada para describir unidades de rocas que rocas individuales. Utilizando el esquema presentado por Hallsworth y Knox (1999), es posible clasificar y denominar cualquier sedimento o roca sedimentaria sin disponer información de su localización y sin la necesidad de realizar suposiciones acerca de su forma de originarse.

Los principios de este esquema de clasificación son los siguientes:

- (i) El término sedimento se utiliza para describir sedimentos no litificados.
- (ii) Los sedimentos y las rocas sedimentarias no deben ser clasificadas acorde a la naturaleza de su deposición. La nomenclatura de los sedimentos y de las rocas sedimentarias se basa, en la medida en que sea posible, en atributos reales y descriptivos, en ningún caso en atributos interpretativos. Por lo tanto, esta clasificación es esencialmente no-genética. Los términos genéticos o relativos a su ubicación pueden utilizarse como calificativos , pero siempre acompañando a la denominación principal.
- (iii) La clasificación obedece a las relaciones geológicas fundamentales y se basa en grupos naturales de sedimentos y rocas sedimentarias.
- (iv) La clasificación primaria de sedimentos y de rocas sedimentarias se basa en sus atributos composicionales presentes en el momento de su deposición. Esto permite establecer los mismos límites composicionales tanto en los sedimentos no litificados como en las rocas sedimentarias.
- (v) Todas las clases se dividen por condiciones límite, tales como la proporción de clastos o de partículas de tamaño grava.
- (vi) Cada clase de sedimentos o de rocas sedimentarias tiene un número de niveles jerárquicos que permiten la simple categorización o la asignación de una denominación más específica. Los calificativos puede ser utilizados para indicar atributos específicos en cada nivel.
- (vii) El esquema de clasificación se basa en esquemas y términos que se utilizan actualmente para describir sedimentos. Hay muchos esquemas diferentes para definir los grupos naturales de sedimentos: siempre que sea posible se incorporarán a esta clasificación los mayormente aceptados.
- (viii) En caso de que sea posible, este esquema permite definir los grupos sin la necesidad de recurrir a análisis petrológicos o geoquímicos.

Estructura del esquema de clasificación

El esquema de clasificación de sedimentos y rocas sedimentarias consiste en 11 categorías. Ocho de ellas se basan en el componente dominante de la composición del sedimento o de la roca sedimentaria en el momento de su deposición. La composición y abundancia de los componentes diagenéticos no deben afectar a la clasificación. Por ejemplo, una arenisca se clasifica preferiblemente acorde a la composición de su detritus, más que acorde a su cemento. La única excepción a esta regla son las rocas sedimentarias puramente diagenéticas en origen, por ejemplo el horsteno (*chert*). La novena categoría se basa en el tamaño de grano o en el tamaño del cristal y permite clasificar de manera sencilla un sedimento sin necesidad de conocer su composición. La categoría 10 abarca los sedimentos y las rocas sedimentarias que están formadas de más de un componente primario. La categoría 11 incluye sedimentos volcánicos y rocas sedimentarias volcánicas.

Las categorías en las que se dividen los sedimentos y rocas sedimentarias, según esta clasificación son las siguientes:

- (i) Sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas
- (ii) Sedimentos y rocas sedimentarias carbonáticas
- (iii) Sedimentos fosfáticos y fosfatitas
- (iv) Sedimentos ferruginosos, y ferrolitas
- (v) Sedimentos y rocas sedimentarias orgánicas
- (vi) Sales no carbonáticas
- (vii) Sedimentos y rocas sedimentarias silícicas no clásticas
- (viii) Miscelánea de hidróxidos, óxidos y silicatos
- (ix) Sedimentos y rocas sedimentarias basadas en el tamaño de grano o cristal
- (x) Sedimentos y rocas sedimentarias híbridas
- (xi) Sedimentos y rocas sedimentarias con derrubios volcanoclásticos

De las anteriores categorías, las que más se ajustan a las margas que constituyen las facies Tap, objeto de este estudio son, por su contenido en arcilla, la categoría (i) *Sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas* y, por su contenido en carbonatos la categoría (ii) *Sedimentos y rocas sedimentarias carbonáticas*.

1. Sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas

Los sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas se definen como aquellas en las que los fragmentos clásticos derivados de rocas silícicas preexistentes constituyen más del 50 % del sedimento o la roca. Este material se divide basándose en el tamaño de grano los siguientes tres grupos:

- Ruditas: los clastos de tamaño superior a 2 mm constituyen más del 25 % de la roca.

Capítulo 2. Antecedentes

- Arenitas: los clastos de tamaño inferior a 32 μm constituyen menos del 75 % de la roca y los clastos de tamaño mayor a 2 mm constituyen menos del 25 % de la roca.
- Argilitas: los clastos de tamaño menos a 32 μm constituyen más del 75 % de la roca.

1.1. Sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas rudíticas.

Tal y como se ha especificado anteriormente, los sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas rudíticas son aquellas que cumplen, por una parte, que los fragmentos siliclásticos constituyen más del 50 % del sedimento o roca y que los clastos de tamaño superior a 2 mm constituyen más del 25 % de la roca.

1.1.1. Sedimentos siliclásticos rudíticos.

La denominación que se le asigna a todos los sedimentos siliclásticos rudíticos es la de gravas silíceas (silicate-gravel). En el caso de que estos sedimentos rudíticos sean difícilmente clasificables y contengan un rango amplio de tamaño de clastos, se les asigna el nombre diamictón.

1.1.2. Rocas sedimentarias siliclásticas rudíticas

La denominación que se le asigna a todas las rocas sedimentarias siliclásticas rudíticas es la de conglomerados silíceos (silicate-conglomerate). En el caso de que estas rocas sedimentarias rudíticas sean difícilmente clasificables y contengan un rango amplio de tamaño de clastos, se les asigna el nombre de diamictita.

1.1.3. Calificativos recomendados

Se pueden añadir calificativos a las anteriores denominaciones basándose en el tamaño de grano (Ej. Gránulo-gradado, *pebble grade* en inglés), en la estructura granular (en función de si la estructura se mantiene por la matriz o por el contacto entre granos), la variedad (polimictico si tiene una gran variedad de tipos de clastos y oligomictico si se compone de un solo tipo de clasto) y la composición de los clastos y su morfología (Ej. Angulares).

1.2. Sedimentos y rocas siliclásticas arenosas

Tal y como se ha especificado anteriormente, los sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas arenosas son aquellas que cumplen, por una parte, que los fragmentos siliclásticos constituyen más del 50 % del sedimento o roca y que existe un predominio de los clastos de tamaño comprendido entre 32 μm y 2mm. A este respecto, las condiciones son que los clastos de tamaño menor a 32 μm constituyan menos del 75 % de la roca sedimentaria o sedimento y que los clastos de tamaño mayor a 2 mm constituyan menos del 25 % de los mismos.

Se utiliza la denominación híbrido en los casos en los que el porcentaje de siliclastos es similar al de carbonatos.

1.2.1 Sedimentos siliclásticos arenosos

La denominación que se le asigna a todos los sedimentos siliclásticos arenosos es la de arenas silícias (*silicate-sand*). En el caso de que estos sedimentos arenosos sean difícilmente clasificables y contengan un rango amplio de tamaño de clastos, se les asigna el nombre diamicton, al igual que a los sedimentos siliclásticos rudíticos.

1.2.2 Rocas sedimentarias siliclásticas arenosas

La denominación que se le asigna a todas las rocas sedimentarias siliclásticas arenosas es el de areniscas silícicas (*silicate-sandstone*). En el caso de que estas rocas sedimentarias arenosas sean difícilmente clasificables y contengan un rango amplio de tamaño de clastos, se les asigna el nombre de diamictitita, al igual a sus homólogas rudíticas.

1.2.3. Calificativos recomendados

Se pueden añadir calificativos a las anteriores denominaciones basándose en el tamaño de grano (Ej. Arenisca silícica gruesa, *coarse silicate-sandstone* en inglés) y en la composición de los clastos no siliclásticos (Ej. Arenisca silícica calciclástica, *calciclastic silicate-sandstone* en inglés).

1.3. Sedimentos y rocas sedimentarias arcillosas

Tal y como se ha especificado anteriormente, los sedimentos y rocas sedimentarias arcillosas son aquellas que cumplen, por una parte, que los fragmentos siliclásticos constituyen más del 50 % del sedimento o roca y que los clastos de tamaño menor a 32 μm constituyen más del 75 % de los mismos.

Todos los sedimentos siliclásticos arcillosos reciben el nombre de fango silícico (*silicate-mud*) y todas las rocas sedimentarias siliclásticas arcillosas reciben el nombre de fangolita silícicas (*silicate-mudstone*).

Si consideráramos a las margas del Tap, objeto de este estudio, como sedimentos siliclásticos o rocas sedimentarias siliclásticas, las clasificaríamos, en base al tamaño de grano como arcillosas. Por este motivo, se profundizará más en la clasificación y nomenclatura de los sedimentos y rocas sedimentarias arcillosas de lo que se ha profundizado en sus homólogas rudíticas y arenosas, de las que se ha hecho una somera descripción.

En función de la proporción de limo y arcilla que contengan los sedimentos siliclásticos arcillosos y las rocas sedimentarias siliclásticas arcillosas Tucker (1991) propone una nomenclatura de este material, partiendo de la clasificación de Twenhofel (1937), que se muestra en la Tabla 2.1.6.

Porcentaje de constituyentes tamaño arcilla	> 50 % de arcilla	< 50 % de arcilla	Nombre de grupo no conocido
Descripción de la muestra de mano de sedimento no litificado	Muestra propiedades plásticas*	Limo abundante visible con lupa y tiene textura grumosa	
Nombre raíz	Arcilla silícica (silicate-clay)	Limo silícico (silicate-silt)	Fango silícico (silicate-mud)
Descripción de la muestra de mano de sedimento litificado	Extremadamente de grano fino con apariencia homogénea	Limo abundante visible con lupa	
Nombre raíz	Argilitia silícica (silicate-claystone)	Lutita silícica (silicate-siltstone)	Fangolita silícica (silicate-mudstone)
*La plasticidad de las arcillas es su capacidad de deformarse cuando el material está húmedo y tener la resistencia suficiente para mantener su forma cuando se le deja de aplicar presión (Fairbridge y Bourgeois, 1978).			

Tabla 2.1.6. Criterio de clasificación de los fangos silícicos y de las fangolitas silícicas (después de Twenhofel, 1937, y Tucker, 1991).

1.3.1 Sedimentos siliclásticos arcillosos y rocas sedimentarias siliclásticas arcillosas con un rango amplio de tamaño de clastos

Los sedimentos arcillosos y las rocas sedimentarias que están pobremente clasificadas y contienen una gran proporción (mayor al 25 % en volumen) de clastos tamaño grava (> 2 mm) reciben un nombre raíz específico. Si el material no está litificado se le denomina diamictón y, en la forma litificada, recibe el nombre de diamictita. Esta definición se basa únicamente en el rango de tamaños de partículas que se encuentra en el material y no en la abundancia relativa de una o de todas las clases de tamaños (Fairbridge y Bourgeois, 1978). Por lo tanto, estos tipos de sedimentos, trasvasan los límites de los sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticas arcillosas y rudíticas. Pueden ser clasificadas con el mismo nombre raíz bajo cualquiera de los esquemas o clasificaciones. El esquema elegido debe depender del tamaño predominante de grano. Deben ser clasificadas únicamente como sedimentos o rocas sedimentarias arcillosos si más del 75 % de las partículas son menores a 32 µm.

La presencia de un tamaño de clasto o partícula subordinado puede también ser descrita utilizando un calificativo apropiado, como por ejemplo fangolita silícica con guijarros silícicos (*silici-pebbly silicate-mudstone*).

1.3.2. Sedimentos siliclásticos arcillosos y rocas sedimentarias siliclásticas arcillosas con alto contenido en materia orgánica

Los sedimentos siliclásticos arcillosos y las rocas sedimentarias con un contenido apreciable de materia orgánica se pueden clasificar de dos formas distintas. Los sedimentos y las rocas sedimentarias usualmente deben ser clasificados como fango silícico (*silicate-mud*) o

Capítulo 2. Antecedentes

como fangolita silícica (*silicate-mudstone*) y se debe añadir un calificativo que describa el componente orgánico que contienen. Sin embargo, si se desea centrar la atención en el componente orgánico, el sedimento se debe clasificar utilizando un esquema paralelo específico para los sedimentos y rocas con alto contenido en materia orgánica. Este esquema paralelo proporciona calificativos tales como: orgánico, carbonático, sapropelico y kerogénico.

1.3.3 Calificativos recomendados

Los nombres raíz y de grupo de los sedimentos y rocas sedimentarias siliclásticos arcillosos se pueden mejorar con la utilización de calificativos. Aunque cualquier característica importante de un fango silícico (*silicate-mud*) o de una fangolita silícica (*silicate-mudstone*) se puede describir con calificativos, se recomiendan los siguientes:

La presencia de partículas siliclásticas no arcillosas se puede describir utilizando calificativos. Por ejemplo una fangolita (*mudstone*) con guijarros siliclásticos se clasificaría como una fangolita silícica con guijarros silícicos (*silici-pebbly silicate-mudstone*).

La presencia de clastos no silícicos se puede describir utilizando calificativos. Por ejemplo una fangolita silícica (*silicate-mudstone*) con calcita se puede describir como fangolita silícica calciclástica (*calciclastic silicate-mudstone*). Si es necesario especificar el tamaño de las partículas no siliclásticas el término "clástico" se puede reemplazar por un término que haga referencia al tamaño de grano, como por ejemplo fangolita silícica con guijarros cálcicos (*calci-pebbly silicate-mudstone*). Si las partículas no siliclásticas son de tamaño arcilla se utiliza un calificativo que haga referencia a su mineralogía, por ejemplo fangolita-silícica calcárea (*calcareous silicate-mudstone*).

También se pueden utilizar calificativos para describir la laminación y fisilidad del material, por ejemplo fangolita silícica fisible (*fissile silicate-mudstone*).

II. Sedimentos y rocas sedimentarias carbonáticas

Los sedimentos carbonáticos se definen como aquellos que tienen más del 50 % de carbonatos. Para denominar una roca como roca carbonática, el criterio de 50% de carbonato no debe de incluir el cemento carbonatado de una roca originariamente no-carbonatada. Si es difícil distinguir los clastos carbonáticos del cemento carbonatado en muestra de mano, se puede asumir que el sedimento es de tipo carbonático.

El porcentaje de carbonato puede incluir al carbonato de calcio, al carbonato de magnesio y al carbonato de sodio. Se definen tres categorías generales de sedimentos carbonáticos en base a la composición del carbonato.

- Sedimentos calizos o calizas (*limestones*): el mineral carbonático dominante es el carbonato de calcio en forma de calcita, aragonita y/o vaterita. La vaterita es una forma hexagonal metaestable del carbonato de calcio. Es excepcionalmente rara y es muy improbable que pueda constituirse como el mineral principal.

Capítulo 2. Antecedentes

- Sedimentos dolomíticos, dolomitas y rocas magnesianas: el mineral carbonático dominante es el carbonato de magnesio en forma de dolomita, ankerita y/o magnesita.
- Rocas sedimentarias de carbonato sódico: el mineral carbonático dominante es el carbonato de sodio.

Se pueden utilizar calificativos para describir carbonatos que tenga una composición intermedia. Por ejemplo, una caliza dolomítica sería aquella cuyo mineral dominante es el carbonato de calcio y a su vez contiene entre un 10 y un 50 % de carbonato de magnesio en forma de dolomita. Si una dolomita contiene entre un 10 y 50 % de carbonato de calcio se puede utilizar el calificativo calcáreo, o siendo más preciso, calcítico o aragonítico, en función de la forma en que se presente el carbonato de calcio.

II.1. Sedimentos calizos (lime sediments) y calizas (limestones)

II.1.1 Sedimentos calizos

El esquema de clasificación de los sedimentos calizos incluye todos los sedimentos compuestos de calcita y/o aragonita. Todos los sedimentos calizos se clasifican en el grupo de sedimentos calizos (*lime-sediments*).

Hay dos esquemas de clasificación disponibles para asignar un nombre raíz a los sedimentos calizos. El primero se basa en el tamaño de partículas y el segundo se utiliza para clasificar a las calizas (*limestones*) compuestas mayoritariamente de un constituyente.

Clasificación de los sedimentos calizos acorde al tamaño de grano

Las clases de tamaño de grano de los sedimentos calizos se definen de la misma forma que las de los sedimentos siliclásticos:

- Gravas (*Gravel*) – más del 25 % de los clastos mayores a 2 mm.
- Arenas (*Sand*) – con predominio de clastos de tamaño entre 32 μm y 2 mm, con menos del 75 % de los clastos menores de 32 μm y menos del 25 % mayores de 2mm.
- Fango (*Mud*) – más del 75 % de los clastos menores de 32 μm .

La composición del carbonato se define con el adjetivo calizo que acompaña al término que hace referencia al tamaño de grano, por ejemplo arena caliza (*lime-sand*). Si el carbonato se compone mayoritariamente de calcita, entonces el adjetivo es calcítico (la nomenclatura en inglés utiliza prefijos en vez de adjetivos, en este caso el prefijo sería *calcite-*), si el componente mayoritario es la aragonita, entonces el adjetivo es aragonítico (*aragonite-*), y si la composición del carbonato no es conocida, se utiliza el calificativo calizo (*lime-*). Si el sedimento contiene más de un tipo de carbonato, se puede clasificar añadiendo un calificativo para designar al componente minoritario, por ejemplo arena aragonítica calcítica (*calcitic aragonite-sand*). El criterio para clasificar los sedimentos carbonáticos se muestra en la Tabla 2.1.7.

Tamaño de grano	Composición		
	Mayoritariamente calcita	Mayoritariamente aragonita	Sin especificar
Rudítico (> 2 mm)	Grava calcítica (<i>calcite-gravel</i>)	Grava aragonítica (<i>aragonite-gravel</i>)	Grava caliza (<i>lime-gravel</i>)
Arenoso (32 µm – 2 mm)	Arena calcítica (<i>calcite-sand</i>)	Arena aragonítica (<i>aragonite-sand</i>)	Arena caliza (<i>lime-sand</i>)
Arcilloso (< 32 µm)	Fango calcítico (<i>calcite-mud</i>)	Fango aragonítico (<i>aragonite-mud</i>)	Fango calizo (<i>lime-mud</i>)

Tabla 2.1.7. Clasificación de sedimentos calizos acorde al tamaño de grano. Tomado de Hallsworth y Knox, 1999.

II.1.2 Calizas

Las rocas sedimentarias que están predominantemente compuestas de carbonato de calcio reciben el nombre de grupo de calizas (*limestones*).

La mayoría de las veces el componente carbonático en las calizas está compuesto de calcita, pero puede estar compuesto de aragonita también. Debido a que la aragonita es un mineral metaestable, los cementos aragoníticos y los clastos raramente se conservan en las calizas antiguas. Sin embargo, algunas calizas más recientes consisten predominantemente en aragonita. Si se conoce que la aragonita constituye más del 50 % del componente carbonático, entonces se le añade el adjetivo aragonítico al nombre de grupo caliza, por ejemplo caliza aragonítica (*aragonite-limestone*, en el caso de que la aragonita constituya menos del 50 %, entonces, su designación en inglés sería *aragonitic limestone*). Aunque al asignar el nombre de grupo caliza (*limestone*) se asume que la roca está compuesta por calcita, es conveniente añadir el adjetivo calcítico (*calcite-*) para especificarlo, cuando se estudian sedimentos recientes, por ejemplo caliza calcítica (*calcite-limestone*).

Si se pretende realizar una clasificación sencilla, la roca debe clasificarse como una caliza (*limestone*) y se deben utilizar calificativos para describir el tamaño de grano o cristal predominante. Por ejemplo, una caliza compuesta de clastos tamaño arena puede describirse como una caliza arenosa (*sand-grade limestone*), mientras que una caliza compuesta por cristales finos se puede describir como caliza cristalina-fina (*fine-crystalline limestone*). En la literatura geológica hay algunos nombres de rocas comúnmente utilizados que tienen una connotación relativa al tamaño de grano, por ejemplo calcirudita. Aunque estos términos no se incluyan dentro de las clasificaciones, pueden emplearse como sinónimos. Se recomiendan los siguientes:

- Calcilutita: puede utilizarse como sinónimo de caliza lutítica (*mud-grade limestone*).
- Calcarenita: puede utilizarse como sinónimo de caliza arenosa (*sand-grade limestone*).
- Calcirudita: puede utilizarse como sinónimo de caliza rudítica (*gravel trade limestone*), caliza granulada...

Capítulo 2. Antecedentes

Existen dos clasificaciones que permiten asignar nombres raíz a las calizas. La primera de ellas se basa en la clasificación textural de Dunham (1962) y modificada por Wright (1962) para incluir a las calizas alteradas diagenéticamente. La segunda clasificación se utiliza para clasificar calizas compuestas predominantemente de un constituyente.

Clasificación de las calizas acorde a la textura

Siguiendo la clasificación de Dunham (1962), Embry y Klovan (1971) y Wright (1992) la primera división de las calizas se realiza acorde a su textura deposicional, biológica o diagénética. Para complementar al nombre raíz, se utiliza la clasificación de Folk (1962) asignando calificativos relativos a la descripción de los clastos y del tipo de cemento.

Los nombres originales propuestos por Dunham (1962) y otros autores se prefijan con *calci-* (*lime-*), o, si se conoce con precisión la mineralogía de la roca, con *calcita-* (*calcite-*) o *aragonito-* (*aragonite-*). Esto se realiza para distinguir a las calizas de las fosforitas y de las rocas férricas, debido a que sus clasificaciones texturales son muy similares. El esquema clasificativo se muestra en la Tabla 2.1.8.

DEPOSICIONAL				BIOLÓGICA	
Contiene matriz (limo y arcilla < 32 µm)		Sin matriz			
Textura matriz-soportada		Textura grano-soportada		Organismos "in situ"	
> 75 % matriz	< 75 % matriz			Organismos incrustantes	Organismos rígidos
Caliza lutítica (<i>lime-mudstone</i>)	Wacke caliza (<i>lime-wackestone</i>)	Caliza packstone (<i>lime-packstone</i>)	Caliza grainstone (<i>lime-grainstone</i>)	Caliza boundstone (<i>lime-boundstone</i>)	Caliza framestone (<i>lime-framestone</i>)
DIAGENÉTICO					
Textura no obliterativa			Textura obliterativa		
Textura visible		Domina el cemento de calcita esferulítica	Cristales de esparita (>32 µm)	Cristales de microesparita (4 – 32 µm)	Cristales de micrita (< 4 µm)
Uso del nombre raíz apropiado y calificativos		Caliza pseudo-esparítica (<i>lime-pseudosparstone</i>)	Caliza esparítica (<i>lime-sparstone</i>)	Caliza microesparítica (<i>lime-microsparstone</i>)	Caliza micrítica (<i>lime-microstone</i>)

Tabla 2.1.8. Clasificación de las calizas a partir de la textura. BGS (1999) a partir de Dunham (1962), Embry y Klovan (1972) y Wright (1992).

Las principales diferencias entre este esquema clasificativo y la clasificación original de Dunham (1962), Embry y Klovan (1971) y Wright (1992) son:

- El esquema clasificativo sigue asimilando la matriz a carbonato de tamaño fango de acuerdo con Dunham (1962). Asimismo, el límite superior del fango se define en 0.032 mm para ser consistente con el resto de esquemas de otros autores.

- Dunham (1962) define *wackestones* como aquellas que tienen más del 10% de partículas, y lutitas como las que tienen menos del 10% de partículas. Ahora se definen las *wackestones* como aquellas que tienen menos de un 75% de matriz (carbonato de tamaño fango) mientras que las lutitas tienen más de un 75% de matriz. Esto hace que el esquema sea consistente con otros esquemas de clasificación y permite una mejor clasificación de los sedimentos y rocas híbridas.
- Embry & Klovan (1971) introdujeron los términos *floatstone* y *rudstone* para describir las *wackestones* de grano grueso (más de un 10% de partículas mayores a 2 mm) y calizas grano-soportadas. Estos términos no se pueden incluir ya que describen una textura ya cubierta por la clasificación. El tamaño de partícula puede ser descrito utilizando un adjetivo apropiado de tamaño de partícula, como por ejemplo *calci-packstone* gravosa.
- El término *bafflestone* introducido por Embry & Klovan (1971) es interpretativo y por lo tanto no se incluye en el esquema de clasificación.
- Wright (1992) introduce una serie de clases diagenéticas, las cuales no han sido incluidas en su totalidad en el esquema de clasificación (ex: *condensed fitted grainstone*). Esto es debido a que la clasificación se basa en atributos deposicionales en lugar de características diagenéticas. Las características diagenéticas se añaden usualmente como calificativos del nombre raíz. La distinción pueden ser confusas en carbonatos resultantes de diagénesis o cuando el cemento se depositó de manera contemporánea a los clastos calizos. Por tanto, se requieren nombres específicos para describir algunas calizas con texturas diagenéticas. Los términos *esparita* (*sparstone*) y *microesparita* (*microsparstone*) se han retenido para describir calizas con texturas diagenéticas obliterativas. Los tamaños de cristal recomendados por Wright (1992) se han modificado para hacerlos consistentes con los tamaños de cristal utilizados en el resto de esquemas. El tipo de calizas con texturas diagenéticas no-obliterativas llamadas *cementstones* por Wright (1992) se denominan ahora como *pseudoesparitas* (*pseudosparstones*), para evitar cualquier confusión con los términos informales de las calizas utilizadas para fabricar cemento. Los términos *condensed fitted*, y *fitted* no se han incluido como radical ya que las rocas se pueden clasificar como *grainstones* y utilizar el término diagenético como calificativo. Los radicales, y sus calificativos para texturas diagenéticas solo se pueden utilizar adecuadamente después de un estudio petrográfico.

Definición de las clases texturales

Los diferentes nombres raíz se muestran utilizando el prefijo calci-, que puede ser reemplazado por calcita- o aragonito- si se conoce la mineralogía exacta.

Clases texturales de depósito:

- Carbonatos matriz-soportados. El término matriz se refiere al material lutítico de tamaño inferior a 0,032 mm.

o Calci-lutita, roca formada por más del 75% de calcita de tamaño lutita (<0,032 mm)

Capítulo 2. Antecedentes

o Calci-wackestone, roca matriz-soportada que contiene menos de un 75% de calcita de tamaño lutita (<0,032 mm)

- Carbonatos grano-soportados:

o Calci-packstone roca grano-soportada con matriz que llena el espacio intergranular.

o Calci-grainstone roca grano-soportada con poca matriz.

Calificativos

- Calificativos para el tamaño de partícula: El tamaño de partícula predominante se puede matizar añadiendo un adjetivo de tamaño de partícula, como por ejemplo calcita-grava granulada o calcarenita gruesa. Si el sedimento o la roca contienen un componente subsidiario de diferentes tamaños, se podría definir por ejemplo como calci-lutita calci-granulada.

- Calificativos para describir el cemento carbonatado: El cemento carbonatado se puede definir de acuerdo al tamaño de cristal siguiendo la terminología de Folk (1962). Para asegurar la consistencia entre los términos específicos de los carbonatos y los términos de tamaño de partícula utilizados en el resto de esquemas, se han modificado las condiciones límite propuestas per Folk. Los nuevos tamaños de cristal son más fáciles de definir utilizando un microscopio, tal como se muestra en la tabla 2.1.9.

Tamaño de cristal	Propiedades ópticas	Calificativos para calizas	Calificativos para dolomías	Términos para tamaño de cristal en el resto de la clasificación
> 32 μm	Cristales normalmente de tamaño arena	Esparita	Doloesparita	Cristalina- muy fina
4 – 32 μm	Cristales identificables al microscopio óptico	Microesparita	Dolomicroesparita	
< 4 μm	Cristales no identificables al microscopio óptico	Micrita	Dolomicrita	Criptocristalina

Tabla 2.1.9. Tamaño de partícula y calificativos utilizados para la clasificación de calizas. Tomado de Bofill (2013).

- Calificativos para describir texturas con connotaciones genéticas: Hay ciertos tipos de calizas que reciben un nombre genético. Estos nombres son interpretativos y por tanto no se incluyen en los esquemas de clasificación. En cualquier caso, si se conoce el origen de la roca, el nombre genético puede ser utilizado como calificativo al lado del término formal, como por ejemplo caliza travertínica. La clasificación en base a les

Capítulo 2. Antecedentes

propiedades físicas y de texturas ha de prevalecer siempre que sea posible. Los calificativos genéticos más comunes asociados a las calizas son toba, travertino y calcreta. Si la roca es un depósito superficial moderno, con un tipo de deposición obvia se podría clasificar según el esquema de depósitos superficiales (McMillan y Powell, 1999) y recibir un nombre genético.

2.2 ANTECEDENTES DE DURABILIDAD Y DEL *SLAKE DURABILITY TEST*

2.2.1 Las rocas arcillosas en la Tierra

Las rocas blandas arcillosas representan más del 60 % de las rocas sedimentarias en la superficie terrestre y aproximadamente dos tercios de la columna estratigráfica (Blatt, 1982). Con respecto a la superficie total de la tierra se estima que este tipo de rocas aflora en un tercio de la superficie terrestre (Franklin, 1983).

2.2.2 Las Facies Tap en Alicante

Esta tesis tiene por objeto caracterizar geológica y geotécnicamente un material neógeno mioceno denominado como Tap, que aflora en el sur de la provincia de Valencia y en la mitad septentrional de la provincia de Alicante, en la rama nororiental de la Cordillera Bética. Las Facies Tap, dentro de la columna estratigráfica, se ubican en el Mioceno y están constituidas por margas de color blanquecino. Estas rocas blandas arcillosas pueden comportarse como suelo o como roca, dado que su resistencia y compacidad les hace tener un comportamiento intermedio entre estos dos tipos de materiales.

2.2.3 Problemática

La idea de esta tesis surge como consecuencia de la observación de problemas de estabilidad en taludes realizados en obras lineales que discurren sobre este material. Es un material muy alterable y degradable, sensible a las condiciones atmosféricas naturales y a los cambios en el contenido de humedad, que con el paso del tiempo sufre un desmoronamiento, que da lugar a numerosos problemas ingenieriles, principalmente los relacionados con la estabilidad de taludes (Dick y Shakoor, 1992; Gökçeoğlu *et al.*, 2000; Czerewko y Cripps, 2001) y con las excavaciones y perforaciones (Dick *et al.*, 1994).

2.2.4 Modalidades del proceso de desmoronamiento de las rocas blandas arcillosas

Moriwaki y Mitchell (1977) clasificaron los tipos más comunes de desmoronamiento de las arcillas puras en: desmoronamiento por dispersión (*dispersion slaking*), desmoronamiento por hinchamiento (*swelling slaking*), desmoronamiento en bloque (*body slaking*) y desmoronamiento de la superficie (*surface slaking*).

Según Dhakal *et al.* (2002) el tipo de desmoronamiento producido en los materiales arcillosos estaría fuertemente controlado por la mineralogía arcillosa y por la concentración de iones de sodio intercambiables.

Las mezclas de varios minerales arcillosos llevan a diferentes combinaciones de modos de desmoronamiento (Khalily *et al.*, 2013).

2.2.5 Ensayos utilizados para calcular la durabilidad de las rocas blandas arcillosas

Existen varios ensayos para estimar la alteración que sufren las rocas arcillosas al exponerse a procesos atmosféricos, tales como enfriamiento-calentamiento, humedad-sequedad y ciclos de hielo-deshielo, y observar el desmoronamiento que sufren. Tres de los ensayos más populares para determinar la durabilidad al desmoronamiento de las rocas blandas son el *Jar Slake Test* (Wood y Deo, 1975), el *Slake Index Test* (Deo, 1972) y el *Slake Durability Test* (Franklin y Chandra, 1972).

Entre estos ensayos de alteración frente a los agentes atmosféricos, el más utilizado es el *Slake Durability Test* o Ensayo de humedad-sequedad-desmoronamiento, diseñado por Franklin y Chandra en 1972.

Este ensayo trata de cuantificar el debilitamiento originado en la red cristalina de los minerales de la roca por la presencia y desaparición parcial del agua, tras un número determinado de ciclos, y teniendo en cuenta el desmoronamiento sufrido por la muestra a medida que transcurre el ensayo (Torrijo y Cortés, 2007).

Se utiliza fundamentalmente para estudiar el comportamiento de rocas de origen arcilloso o limoso que a lo largo del tiempo pueden sufrir importantes transformaciones debido a su exposición atmosférica.

El índice I_{d2} o Índice Sehudes, que se obtiene del ensayo, es la relación en tanto por ciento entre el peso seco de los fragmentos después de dos ciclos y el que presentaban antes del ensayo.

Pese a que en la redacción de los proyectos de construcción no es habitual la realización de este ensayo, sí que se ha utilizado en numerosos estudios sobre la alterabilidad de las rocas blandas arcillosas.

2.2.6 La influencia de los agentes ambientales

Los procesos atmosféricos que se tienen en cuenta para realizar este ensayo son, habitualmente tres: enfriamiento – calentamiento, humedad-secado y la aplicación de ciclos de hielo-deshielo (Hale y Shakoor, 2003), de los cuáles el último es particularmente efectivo en el desmoronamiento y desintegración de las rocas arcillosas, mientras que el efecto del primero de ellos da lugar a una desintegración insignificante (Erguler and Shakoor, 2009).

Este es un aspecto a tener en cuenta antes de la realización del ensayo, ya que según la zona de la cuál extraemos la muestra será conveniente aplicarle uno o varios de los procesos anteriormente mencionados. Por ejemplo, será razonable aplicar el proceso hielo-deshielo a muestras procedentes de países como Arabia Saudí, Kuwait, Qatar y Yemen, que tienen un clima desértico con una gran contraste de temperaturas entre el día y la noche (Erguler y Shakoor, 2009). Sin embargo en muestras extraídas de países como Estados Unidos o Turquía, que se caracterizan por inviernos con nevadas frecuentes, primaveras lluviosas y veranos calurosos, será razonable aplicar los tres procesos.

2.2.7 Discusión sobre el número de ciclos necesarios

Un aspecto del SDT que crea mucha controversia, y sobre el que existe una amplia bibliografía es la determinación del número de ciclos suficiente que hay que aplicar a la muestra para determinar correctamente la durabilidad.

Franklin y Chandra (1972), así como el ISRM (2007) y el ASTM (2004) sugieren usar el Índice Sehudes o índice del segundo ciclo del *Slake Durability Test* (Id_2) en el cálculo de las propiedades de desmoronamiento de las rocas. Sin embargo Santi (1998) defiende que solo es necesario aplicar el primer ciclo del *Slake Durability Test* a la muestra, ya que el primer índice del *Slake Durability Test* (Id_1) es un excelente indicador de los ciclos posteriores y, por lo tanto, la obtención del segundo índice, tal y como recomienda la ASTM D4664-87 es innecesaria.

Otros autores más conservadores recomiendan la realización de tres o más ciclos para caracterizar la durabilidad de las limolitas (Taylor, 1998; Moon y Beattie, 1995; Ulusay *et al.*, 1995; Bell *et al.*, 1997), mientras que Gökçeoğlu *et al.* (2000) y Gökçeoğlu y Aksoy (2000) recomiendan realizar 4 ciclos. Martínez-Bofill *et al.* (2011) llegaron a la conclusión de que era necesario aplicar 5 ciclos del *Slake Durability Test* a las muestras a partir de la observación de que para el quinto ciclo de ensayo (Id_5), las muestras envejecidas mediante ciclos de congelación y deshielo daban lugar a una separación más evidente de los comportamientos. Dhakal *et al.* (2002) realizan entre 10 y 20 ciclos para caracterizar la durabilidad de algunas arcillitas y limolitas y Rintrawilai (2010) defiende que la fiabilidad de la predicción depende mucho del número de ciclos del ensayo y proponer llevar a cabo más de 20 ciclos en rocas con baja o muy baja durabilidad y entre 5 y 10 ciclos en rocas con durabilidad alta o muy alta.

Erguler y Ulusay (2009) estudiaron las características de desintegración de las rocas arcillosas tanto en campo como en laboratorio y llegaron a la conclusión de que era necesario aplicar entre 11 y 15 ciclos del ensayo en laboratorio para obtener un grado de desintegración similar al que había sido observado en el campo.

Martínez-Bofill *et al.* (2013) llevaron a cabo una propuesta de mejora de la sensibilidad del *Slake Durability Test* para la caracterización de taludes excavados en rocas arcillosas y determinaron que la realización de dos ciclos no era suficiente para la caracterización de la durabilidad en rocas arcillosas, a partir de la observación de que los resultados del Id_2 sobre muestra intacta eran sistemáticamente muy optimistas, clasificando las rocas como de alta o muy alta durabilidad. Defienden que los mejores resultados se obtienen realizando al menos 4 ciclos del ensayo, sobre muestra intacta y sobre muestra envejecida en ciclos de congelación, ya que a partir del tercer ciclo del ensayo el índice de durabilidad de algunas muestras diverge ligeramente.

2.2.8 Durabilidad según el tipo de roca arcillosa

Gautam y Shakoor (2013) investigaron el comportamiento frente al desmoronamiento de diferentes tipos rocas blandas (arcillitas, lodos, limolitas y pizarras) exponiéndolas a condiciones climáticas naturales durante un año y obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) Las arcillitas son las rocas menos durables.
- 2) Los lodos, pese a arrojar resultados muy variables de desmoronamiento, ofrecen mayor resistencia que las arcillitas.
- 3) Las limolitas son las rocas blandas más durables.
- 4) El desmoronamiento de las pizarras viene altamente influenciado por su fisilidad y por su naturaleza, siendo las rocas arcillosas las que mayor desmoronamiento sufren y las de naturaleza limosa las que ofrecen mayor resistencia al desmoronamiento.
- 5) El comportamiento frente al desmoronamiento de las rocas arcillosas viene altamente influenciado por su contenido en arcillas, sus valores de absorción y adsorción y su plasticidad.

2.2.9 Factores que afectan a la durabilidad

La durabilidad de las rocas blandas arcillosas, como una medida de su deterioro con el tiempo, depende mucho de la interacción entre la roca y el agua (Hudec, 1982).

Erguler y Ulusay (2003) observaron que las rocas que presentaban un mayor grado de desmoronamiento correspondían con las que tenían un **contenido en arcilla** mayor, dado que este tipo de rocas tiende a absorber y adsorber más agua, la cual debilita los enlaces intergranulares facilitando el desmoronamiento. Además observaron que la presencia de **minerales arcillosos expandibles** incrementa los valores de absorción y adsorción, y por tanto, el grado de desmoronamiento de la roca. También relacionaron la **plasticidad** de las rocas con su grado de desmoronamiento, de modo que las rocas con mayor plasticidad daban valores mayores del índice de desmoronamiento. Sin embargo, en un trabajo posterior Erguler y Shakoor (2009) concluyen que el porcentaje de absorción, el porcentaje de minerales arcillosos (<0,002 mm), el porcentaje de minerales arcillosos expandibles y el porcentaje de minerales mezclados en las capas muestran una relación con el ratio de desintegración entre débil y modesta.

Martínez-Bofill (2011) realizó el ensayo SDT sobre muestras provenientes de taludes de las Variantes de Idiazábal y Ormaiztegui (País Vasco) construidos sobre formaciones rocosas consistentes en una alternancia de argilitas-limolitas con limolitas y areniscas-calizas y explicaron que los bajos valores de durabilidad obtenidos en el ensayo se debían a una baja **tasa de cementación** por calcita y/o ankerita, una proporción importante de **moscovita e illita** y a la presencia de **interestratificados illita-esmectita**. También concluyeron que las muestras con mayor propensión a la degradación son aquellas que combinan un elevado contenido de matriz arcillosa con porcentajes de cemento y esqueleto granular más bajos, tal como lo son las correspondientes a los wackes arcillosos.

2.2.10 Debilidades del ensayo

Pese a que el *Slake Durability Test* es un ensayo muy estudiado y del que se ha escrito amplia bibliografía, tiene ciertas debilidades, principalmente debidas a la dificultad de correlacionar los resultados obtenidos en laboratorio con lo que realmente le sucede a un talud expuesto a los agentes atmosféricos. Estas debilidades, a su vez, han sido observadas y estudiadas por numerosos autores:

- 1) En el *Slake Durability Test*, las muestras se sumergen en agua solo durante 10 minutos y esta duración no es suficiente para conseguir la saturación de las rocas blandas arcillosas. Basándose en los resultados de los ensayos obtenidos por Erguler (2007), la migración de agua se completa entre las 24 y las 48 horas para rocas blandas arcillosas.
- 2) La desintegración mecánica ocurre como resultado de la colisión de las muestras entre ellas y de la colisión entre la superficie de la muestra y el tambor.
- 3) De acuerdo con el ISRM (2007), las fracciones deben ser aproximadamente esféricas, y las esquinas deben ser redondeadas durante la preparación de la muestra. De forma similar, el ASTM (1996) sugiere eliminar cualquier esquina afilada justo antes realizar el primer ciclo del ensayo. Por lo tanto, con el fin de prevenir la rotura mecánica en este ensayo, son necesarias muestras equidimensionales y aproximadamente esféricas con esquinas redondeadas. Conseguir esta forma de los fragmentos es complicado, particularmente cuando los fragmentos tienden a agrietarse en forma de esquistosidad cuando interactúan con el agua. Incluso cuando es posible obtener fragmentos con formas redondeadas, la mayoría de las rocas blandas arcillosas se desintegran tras el primer ciclo del Slake y adquieren una forma con bordes y superficies afilados que afectan a los ciclos posteriores del ensayo.
- 4) Moon y Beattie (1995) mostraron que durante el *Slake Durability Test*, los materiales rocosos se desintegran en fragmentos de dimensiones de entre 10 y 15 mm durante el primer ciclo, tamaño mucho mayor al de la abertura de la malla metálica del tambor, y por tanto quedan retenidos dentro y considerados, a efectos de cálculo, como material durable.
- 5) Franklin y Chandra (1972) no explicaron claramente porque escogieron un tambor con una malla metálica con una apertura de 2 mm, siendo que en el ensayo se observa un amplio rango de tamaños de desintegración de las rocas blandas arcillosas.

Martínez-Bofill *et al.* (2013) establecieron que el *Slake Durability Test* debería considerar la pérdida de la fracción granulométrica de 12,5 mm para reproducir de forma más adecuada la degradación de la roca, a partir del estudio del potencial de predicción del SDT de la degradabilidad en desmontes.

2.2.11 Sistemas de clasificación

Además de estas consideraciones, que pueden ser tenidas en cuenta a la hora de evaluar los resultados o en vistas de mejorar la sensibilidad del *Slake Durability Test*, se han propuesto algunos sistemas de clasificación para calcular la durabilidad, como la clasificación de

durabilidad-plasticidad propuesta por Gamble (1971) y la sugerida por el ISRM (1981). Gamble (1971) encontró algunas correlaciones significativas entre las propiedades de las rocas blandas arcillosas, como el contenido de agua, el límite líquido y la densidad seca. Gamble (1971) sugirió que las rocas blandas arcillosas pueden ser clasificadas de una forma más óptima basándose en la relación entre el Id_2 y el índice de plasticidad, dividiendo la durabilidad en seis clases. Sin embargo, Gamble (1971) enfatizó en la idea de la importancia del comportamiento in situ de las rocas blandas arcillosas expuestas a procesos atmosféricos, y concluyó que era necesario más trabajo para correlacionar los resultados de los ensayos de laboratorio con el comportamiento en el campo para entender totalmente el comportamiento frente al desmoronamiento de tales tipos de rocas.

Taylor y Spears (1981) adoptaron la clasificación de Gamble (1971) para las rocas blandas arcillosas menos durables. Para el caso de rocas arcillosas de resistencia moderada y alta, Olivier (1979) desarrolló un sistema de clasificación basado en la relación entre el coeficiente de hinchamiento (hinchamiento libre desde que la muestra ha sido secada en el horno hasta que está saturada) y la resistencia a compresión uniaxial (UCS). Al igual que en la clasificación de Gamble (1971), el sistema de Olivier (1979) incluye seis clases de durabilidad.

Franklin (1981) propuso un “sistema de ratios de pizarras” cuantitativo incluyendo el Id_2 , el índice de plasticidad (IP) y el Índice de Carga Puntual (Is_{50}). Grainger (1984) desarrolló una tabla de clasificación basada en la resistencia y en la durabilidad de las lodolitas clasificándolas en tres clases: suelo, no durables y durables. Dick *et al.* (1994) indicó que la mayoría de los sistemas de clasificación mencionados anteriormente tenían límites en su aplicación y esto podía deberse a uno o varios de los siguientes motivos:

- 1) Los sistemas de clasificación fueron desarrollados para aplicaciones específicas de lodolitas.
- 2) Las clasificaciones estaban basadas en un número insuficiente de muestras y/o una variedad insuficiente de lodolitas.
- 3) Las clasificaciones no distinguían entre diferentes tipos de lodolitas.

Como consecuencia, propusieron una clasificación de la durabilidad basada en características litológicas.

Tal como se puede deducir de los anteriores sistemas de clasificación, el uso del Índice Sehudes (Id_2) está muy extendido en la evaluación y clasificación de las rocas arcillosas. Sin embargo, a causa de las fuertes colisiones (entre el tambor y los fragmentos y entre los fragmentos entre sí) que se producen en el *Slake Durability Test* standard, éste no funciona en materiales demasiado desmenuzables como para resistir los ciclos de este ensayo, ya que los fragmentos mayores a 2 mm que se desmoronan durante el ensayo son considerados durables en este ensayo (Moon y Beattie, 1995; Gökçeoğlu, 1997; Koncagul y Santi, 1999; Gökçeoğlu *et al.*, 2000; Sadisun *et al.*, 2005; Erguler, 2007). Este hecho resulta en que el Índice Sehudes no sea apropiado para calcular la durabilidad de algunos tipos de rocas arcillosas, especialmente aquellas que se desintegran en fragmentos con estructura lajosa (Davis y Reynolds, 1996; Erguler, 2007), y que por lo tanto no sea representativo para caracterizar el comportamiento de las arcillas en las condiciones naturales.

2.3 ANTECEDENTES DE INFLUENCIA DE ALGUNOS FACTORES EN LA DURABILIDAD

Santi y Higgins (1998) realizaron un estudio para predecir los índices de durabilidad frente al desmoronamiento (I_{d1} e I_{d2}) de pizarras a partir de los siguientes parámetros de campo: el Índice de calidad de rocas en túneles (Q), el *slake index*, el *jar slake* y la dureza determinada con el martillo de Schmidt (*hammer rebound*), obteniendo las siguientes relaciones empíricas:

$$ID1=67-4.4Q-3.4\textit{hammer rebound}+4.2\textit{jar slake}-0.5\textit{slake index}, \text{ con } R^2 = 0.8336$$

$$ID2=66.5-3.7Q-3.7\textit{hammer rebound}+7.2\textit{jar slake}-0.5\textit{slake index}, \text{ con } R^2 = 0.8495$$

Miščević y Roje-Bonacci (2001) proponen una clasificación de la durabilidad de las rocas arcillosas en relación varios parámetros índice, que se muestra en la Tabla 2.3.1.

	Contenido en carbonatos C (%)	Índice de durabilidad Slake (I_{d2})	Absorción de agua w_{sl} (%)	Hinchamiento libre s_{sl} (%)	Tiempo de inicio de desmoronamiento t_{deco}
<i>Material rocoso que puede considerarse como una roca "clásica"</i>	> 90 %	> 95 %	< 3 %		
<i>Material rocoso susceptible de meteorización</i>	75 % - 90 %	90 % - 95 %	3 % - 6 %	0 % - 10 %	> 7 días
<i>Material rocoso que puede clasificarse como blando o no durable</i>	< 75 %	< 90 %	> 6 %	> 10 %	< 7 días

Tabla 2.3.1. Clasificación de la durabilidad de las rocas arcillosas. Miščević y Roje-Bonacci (2001).

Singh *et al.* (2005) realizó un estudio basándose en el procesamiento automático de redes de neuronas artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*) y relacionó el Índice Sehúdes (I_{d2} , parámetro de salida) de rocas blandas arcillosas con el pH del agua utilizada en el ensayo (pH, parámetro de entrada 1), la resistencia a compresión uniaxial (UCS, parámetro de entrada 2), la resistencia a cortante (parámetro de entrada 3) y la resistencia a tracción (parámetro de entrada 4), dando lugar a siguientes gráficos de superficie mostrados en la Figura 2.3.1.

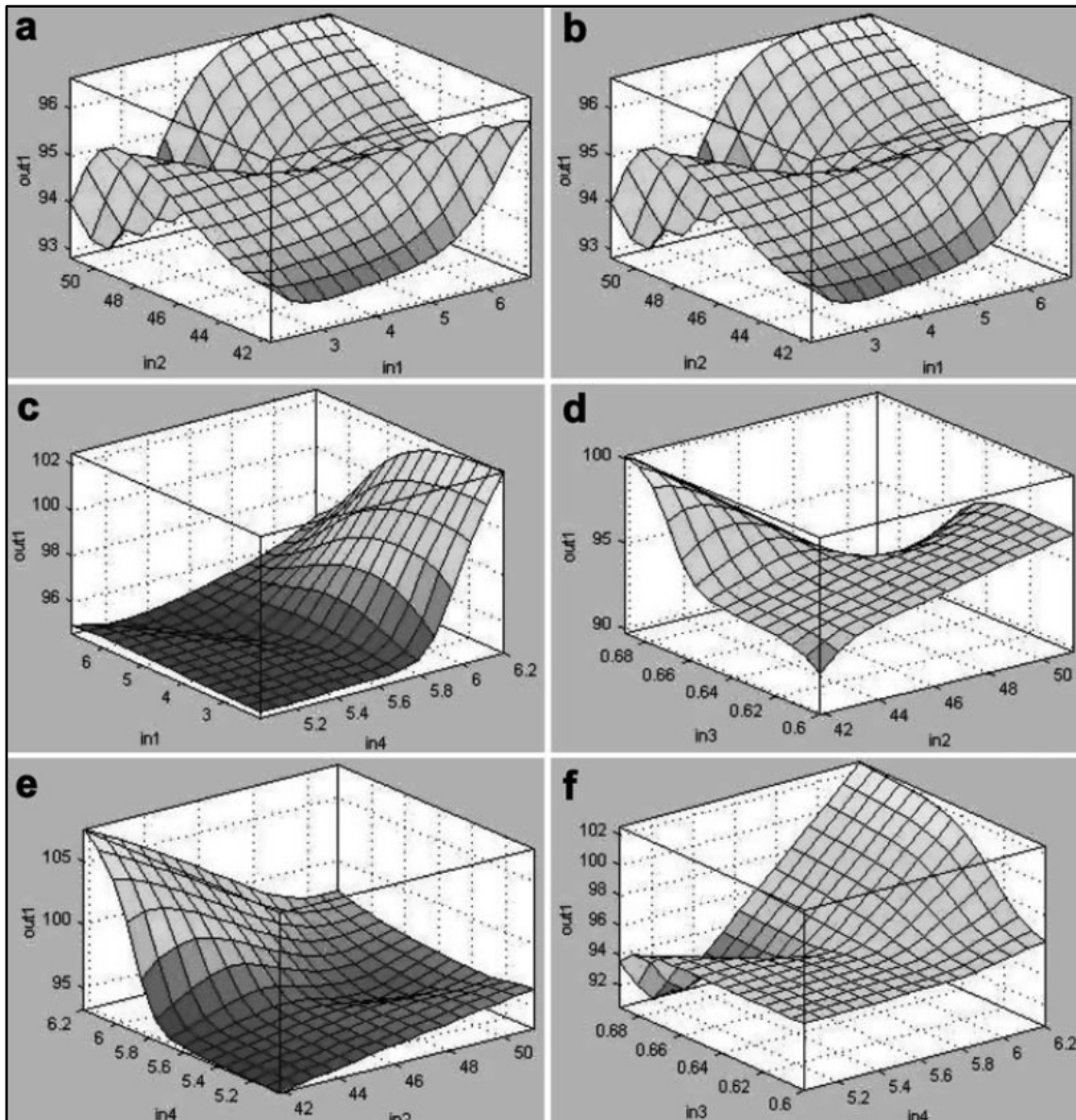


Figura 2.3.1. Gráficos de superficie para la determinación del Índice Sehués. Tomado de Singh *et al.* (2005).

Santi (2006) realizó un compendio de tablas y sistemas de clasificación ya existentes con el fin de facilitar el reconocimiento de los problemas ingenieriles potenciales (desmoronamiento, reactividad con el agua, disminución de la resistencia con el tiempo e influencia de la existencia de fragmentos muy duros en una matriz blanda)que pueden presentar en el campo las pizarras y las rocas blandas.

Kolay y Kayabali (2006) investigaron el efecto de la forma de los granos y la rugosidad superficial en el Índice Sehués (Id_2) utilizando el método de la dimensión fractal, obteniendo mejores resultados del Índice Sehués en los fragmentos esféricos ($Id_{2(RN)}$) que en los angulares ($Id_{2(AN)}$) estableciendo la siguiente relación empírica:

$$Id_{2(RN)} = 0.86161 \cdot Id_{2(AN)} + 34.562, \text{ con } R^2 = 0.92$$

Capítulo 2. Antecedentes

También relacionan la carga puntual ($I_{s(50)}$), la densidad seca (ρ_d) y la dimensión fractal (D) con el Índice Sehúdes:

$$Id2 = I_{s(50)} \cdot 80.28 + \rho_d \cdot 74.36 - D \cdot 685.805 - \rho_d \cdot I_{s(50)} \cdot 30.77 + 603.48, \text{ con un coeficiente de determinación } R^2 = 0.65$$

Gupta y Ahmed (2007) calcularon la degradabilidad en muestras de caliza, pizarra y limolita, en función del pH del agua utilizada en el *Slake Durability Test*. En las rocas con un contenido considerable de carbonatos (60 %), la degradabilidad es mayor en soluciones ácidas. También observaron que las calizas de grano fino son más susceptibles a degradarse comparándolas con las de grano grueso.

Khalily *et al.* (2008) realiza ensayos en calizas margosas con una proporción de carbonatos superior al 80 % y sugiere que la resistencia a compresión simple no tiene influencia en la durabilidad de la caliza margosa. También apunta que la composición mineral y las características textural de las rocas afecta en gran medida en la durabilidad frente al desmoronamiento.

Moradian *et al.* (2010) investigaron la forma de predecir el Índice de durabilidad frente al desmoronamiento (ID) mediante ensayos indirectos, llegando a establecer una relación empírica entre este parámetro y la porosidad (P) y la velocidad de las ondas P (v_p , en km/s):

$$ID = 88.54 - 0.51 \cdot P + 12.58 \cdot \ln(v_p), \text{ con } R^2 = 0.89$$

2.4 PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS RELACIONADOS CON LA DURABILIDAD

2.4.1 Introducción

La clasificación de las partículas de un suelo con la utilización de tamices y mallas es un ensayo elemental imprescindible para la caracterización inicial de los suelos, especialmente en los suelos granulares. Los suelos arcillosos y limosos, también requieren este ensayo, aunque en este caso los valores de los Límites de Atterberg nos proporcionan más información acerca de su comportamiento que la distribución granulométrica.

Tal como escribe Morilla (2012) en su libro Interpretación de los ensayos geotécnicos en suelos *“el comportamiento mecánico de suelos granulares (gravas y arenas) está mucho más influido por la curva granulométrica que por el porcentaje de finos (limos y arcillas), por lo que en ellos es determinante su tamaño máximo, su gradación granulométrica, su coeficiente de uniformidad y las lagunas que puedan existir en determinados tamaños, y todos estos datos influyen más que la plasticidad de los finos, el porcentaje de éstos y la humedad que puedan retener”*.

Sin embargo, para los suelos finos dice *“el comportamiento mecánico de los suelos finos, está mucho más influido por su plasticidad, expresada por los límites de Atterberg, como límite líquido (LL), límite plástico (LP), límite de retracción (LR), índice de plasticidad (IP = LL – LP) y sobre todo por la humedad natural o de compactación, que a su vez modifica los índices anteriores; todos estos datos, influyen más que la granulometría, que suele ser muy simple y a efectos prácticos se suele resumir en el porcentaje en peso que pasa por un tamiz muy fino, entre 50 y 80 micras según la nacionalidad de la Norma de Ensayo”*.

Las antiguas clasificaciones de suelos por tamaños seguían la “Ley del 2” (Tabla 2.4.1) o la “Ley del 5” (Tabla 2.4.2). Sin embargo, el criterio más extendido es el publicado por la ISSS (*International Society of Soil Science*) y reflejado en la Tabla 2.4.4. Los tamaños más utilizados en las plantas de machaqueo y clasificación de áridos o en las plantas de clasificación de los yacimientos granulares son los reflejados en la Tabla 2.4.3.

Gravas gruesas	de 200 a 20 mm
Gravillas	de 20 a 2 mm
Arena gruesa	de 2 a 0.2 mm
Arena fina	de 0.2 a 0.02 mm
Limo	de 0.02 a 0.002 mm
Arcilla	menor de 0.002 mm

Tabla 2.4.1. Clasificación de suelos por tamaños según la "Ley del 2". Extraído de Morilla (2012).

Gravas muy gruesas	de 500 a 50 mm
Gravas	de 50 a 5 mm
Arena gruesa	de 5 a 0.5 mm
Arena fina	de 0.5 a 0.05 mm
Limo	de 0.05 a 0.005 mm
Arcilla	menor de 0.005 mm

Tabla 2.4.2. Clasificación de suelos por tamaños según la "Ley del 5". Extraído de Morilla (2012).

Grava	50 a 25 mm
Gravillas	25 a 12 mm
Gravilla fina (o garbancillo)	12 a 5 mm
Arena	5 a 0 mm (esta última con limitación del contenido de finos que pasan por el tamiz)

Tabla 2.4.3. Tamaños comerciales utilizados en plantas de machaqueo. Extraído de Morilla (2012).

Denominación	Fracción	Tamaño de partículas (mm)
Grava	GRUESA	$60 > \phi > 2$
Arena		$2 > \phi > 0.06$
Limo	FINA	$0.06 > \phi > 0.002$
Arcilla		$0.002 > \phi$

Tabla 2.4.4. Criterio publicado por la ISSS.

En cuanto los tamices utilizados en la realización de ensayos geotécnicos, los más empleados son los que designan las clasificaciones de la UNE y de la ASTM y que se reflejan en la Tabla 2.4.5.

Los aspectos de las curvas granulométricas típicas, para una primera interpretación de sus propiedades ingenieriles se puede apreciar en la Figura 2.4.1.

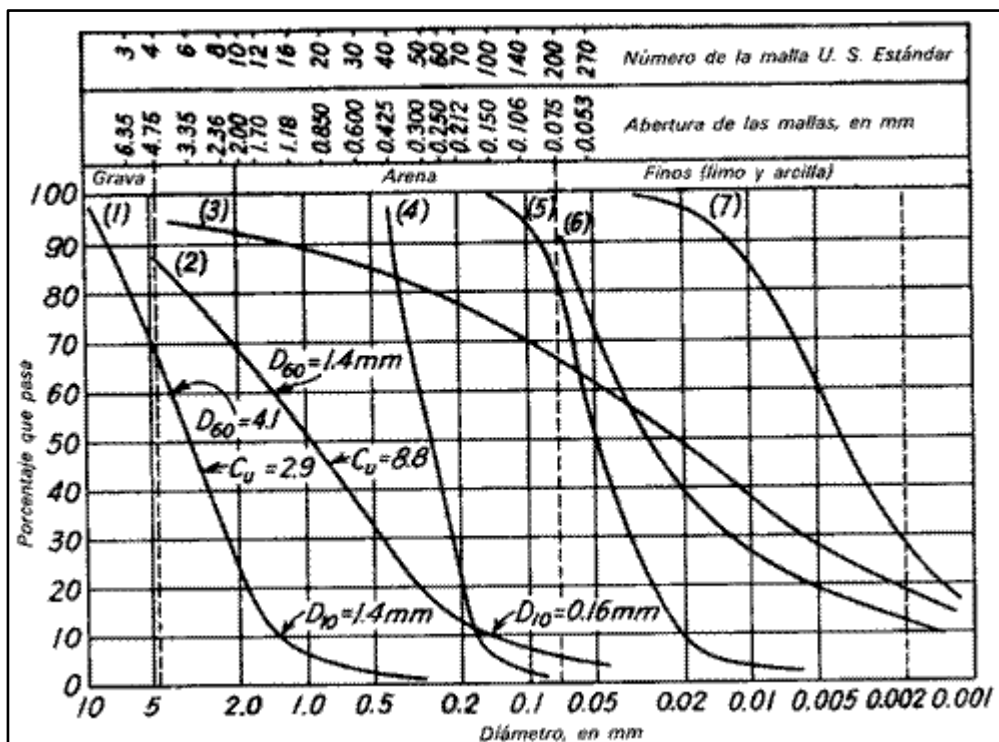


Figura 2.4.1. Curvas típicas de distribución granulométrica de algunos suelos naturales. (1) Gravilla (2) Grava de río (3) Morrena glacial (4) Arena (5) Polvo de roca glacial (6) Limo arcilloso (7) Arcilla limosa.

DESIGNACIÓN Y ABERTURA EN mm UNE	DESIGNACIÓN DEL TAMIZ ASTM	ABERTURA EN mm ASTM
125	5	127
100	4	101.6
80	3	76.2
63	2.5	63.5
50	2	50.8
40	1.5	38.1
32	1.25	31.7
25	1	25.4
20	3/4	19.1
16	5/8	15.9
12.5	1/2	12.7
10	3/8	9.52
8	5/16	7.93
6.3	1/4	6.35
5	Nº 4	4.75
4	Nº 5	4.00
3.2	Nº 6	3.36
2.5	Nº 8	2.38
2	Nº 10	2.00
1.6	Nº 12	1.68
1.25	Nº 16	1.19
1	Nº 18	1.00
0.8	Nº 20	0.84
0.63	Nº 30	0.59
0.50	Nº 35	0.50
0.40	Nº 40	0.42
0.32	Nº 50	0.297
0.25	Nº 60	0.250
0.20	Nº 70	0.210
0.16	Nº 80	0.177
0.125	Nº 120	0.125
0.100	Nº 140	0.105
0.080	Nº 200	0.074
0.063	Nº 230	0.062
0.050	Nº 270	0.053
0.040	Nº 325	0.044

Tabla 2.4.5. Abertura de la serie de tamices UNE y correspondientes de la serie ASTM.

Para determinar la forma de las curvas granulométricas, su uniformidad y su curvatura se emplean los tamaños de tamiz que dejan pasar unos porcentajes del 60%, 30 % y 10% denominados respectivamente D_{60} , D_{30} y D_{10} . A partir de estos tamaños de tamiz, definimos los siguientes conceptos:

- Diámetro eficaz (D_{10}): es el tamaño de partícula para cual el 10% en peso del suelo es menor que él.

Capítulo 2. Antecedentes

- Coeficiente de uniformidad (C_u): se define mediante la expresión $C_u = D_{60}/D_{10}$ y sirve para medir y calificar el grado de distribución de tamaños de las partículas de un suelo. Por ejemplo, si todas las partículas son muy similares en tamaño, D_{60} y D_{10} no diferirán mucho, el coeficiente C_u será pequeño y el suelo se dice que es “uniforme” o “mal graduado”. Por el contrario, si el suelo tiene abundancia de tamaños intermedios entre el máximo y el mínimo, D_{60} y D_{10} diferirán sustancialmente, el coeficiente C_u será grande y el suelo se dice que está “bien graduado”.
- Coeficiente de curvatura (C_c): se define mediante la expresión $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$ y refleja la curvatura de la curva granulométrica.

La Figura 2.4.2 muestra tres ejemplos de curvas granulométricas. Según los conceptos que acabamos de definir, la curva de color azul, correspondiente a una arena con gravas, se trataría de un suelo bien graduado, con todos los tamaños intermedios. La curva de color rojo que corresponde a una arena fina, es un suelo uniforme ya que la gran mayoría de sus partículas tienen un tamaño muy similar. La curva de color verde corresponde a una arcilla limosa bien graduada.

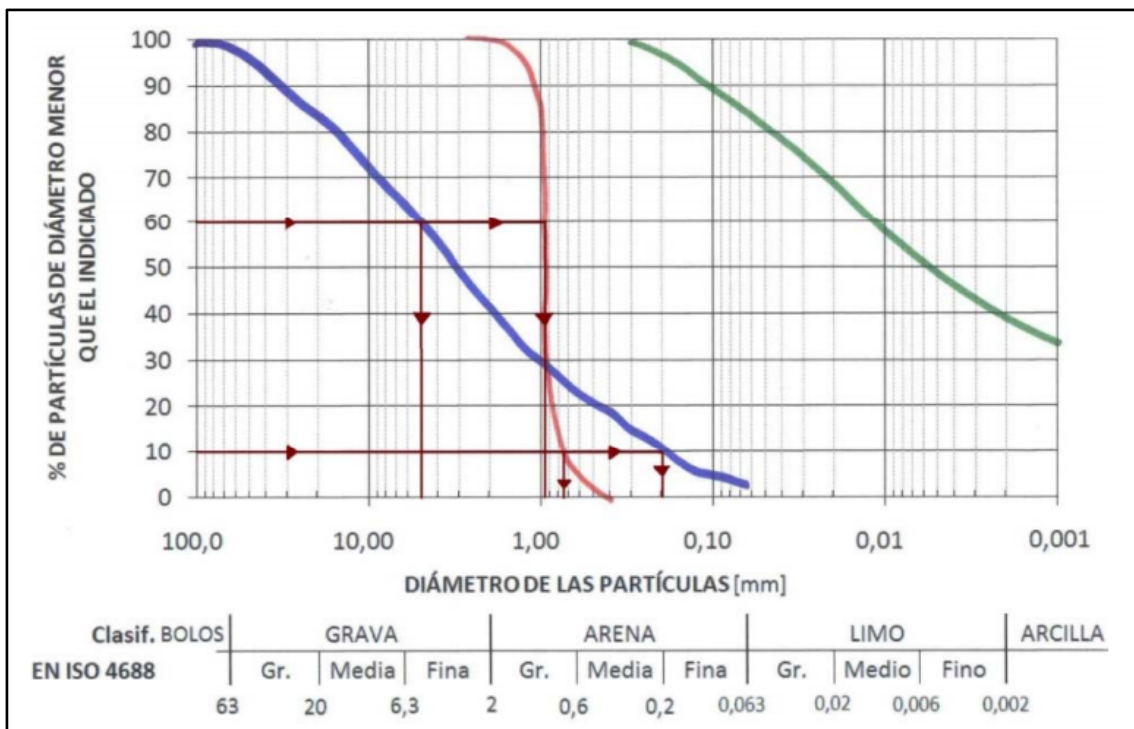


Figura 2.4.2. Ejemplos de curvas granulométricas.

2.4.2 Influencia de las propiedades de las partículas en la durabilidad

La mineralogía y la disposición geométrica (microestructura) afecta al desmoronamiento y la resistencia de las rocas blandas (Koncagül y Santi, 1999). Existen varios factores relacionados

Capítulo 2. Antecedentes

con ciertas características de las partículas del suelo que afectan a las propiedades geomecánicas de las rocas blandas:

1. Tamaño de partícula inherente:

Los sedimentos de grano fino son más susceptibles a desintegrarse, y en ratios mucho más altos que los sedimentos de grano grueso (D'Appolonia Consulting Engineers, 1980). Sin embargo, las muestras de grano fino tienen mayor resistencia a la compresión simple (Brace, 1961; Fahy y Guccione, 1979), debido a que en las probetas de suelos de grano fino existe un número mayor de contactos entre partículas.

2. Forma de las partículas:

Varios investigadores (Fahy y Guccione, 1979; Ulusay *et al.*, 1991; Shakoor y Bonelli, 1991) encontraron una correlación positiva entre la resistencia a la compresión simple y el porcentaje de partículas angulares, debido a una mayor intercalación de las partículas.

Las rocas cuyas partículas son más esféricas son más durables (D'Appolonia Consulting Engineers, 1980) ya que las partículas con bordes afilados se exponen a un mayor grado de abrasión en el *Slake Durability Test*, resultando en un menor índice de durabilidad.

3. Densidad de compacidad:

La densidad de compacidad se define como el espacio ocupado por las partículas en un área determinada. Numerosos investigadores han relacionado la densidad de compacidad de un suelo con la resistencia a la compresión simple, la resistencia a la tracción, la dureza y la durabilidad:

- Bell (1978) mostró que las areniscas con una mayor densidad de compacidad tenían una mayor resistencia a compresión simple y una mayor resistencia a tracción. Hoek (1965) sugirió que una mayor densidad de compacidad incrementaba considerablemente el esfuerzo necesario para que se produjera la propagación de fracturas a través de los bordes de las partículas.
- Doberenier y Freitas (1986) concluyeron que las areniscas blandas se caracterizan generalmente por tener densidades de compacidad bajas.
- Shakoor y Bonelli (1991) no encontraron ninguna relación significativa entre la densidad de compacidad y la resistencia, sin embargo Koncagüly y Santi (1999) creen razonable pensar que una mayor densidad de compacidad incrementa la resistencia a la compresión simple, la dureza y el Índice Slake de los suelos.

2.5 OTROS ÍNDICES DE DURABILIDAD

2.5.1 Índice de desintegración (Erguler y Ulusay, 2009)

La muestra inicial consiste en una cantidad de entre 450 y 550 gramos de roca arcillosa disgregada y secada en estufa a 105 °C durante 24 horas. El total de la muestra se sumerge en agua durante 24 horas para separar los fragmentos. Después de esto se lava la muestra en tamices de aperturas 88.90, 76.20, 38.10, 22.40, 19.00, 13.20, 9.50, 8.00, 5.60, 4.75 y 2 mm para separar las partículas o fragmentos flojos. A diferencia de lo que sucede en el ensayo Slake Durability Test, con este modo de proceder se simulan los ciclos de humedad – secado sin que se produzca rotura mecánica. Las fracciones retenidas en cada tamiz se vuelven a secar a 105 °C durante 24 horas y se pesan.

El resultado de este ensayo se denomina Índice de Desintegración, y tiene la siguiente expresión:

$$D_1 = W_2 / W_1 \cdot 100$$

donde:

W_1 es el peso total del material seco

W_2 es el peso del material seco retenido en cada tamiz

2.5.2 Índice de desintegración medio

Erguler y Ulusay (2009) consideraron que la determinación del número de ciclos a los que las muestras son sometidas bajo condiciones de campo es muy importante para un mejor entendimiento de las propiedades de desmoronamiento de las rocas arcillosas.

Para ello se tomaron dos muestras intactas de un afloramiento de rocas blandas arcillosas, a las que denominaron L4 y L9 y se les aplicaron ciclos de humedad – sequedad hasta que alcanzaron el mismo grado de desintegración observado en el campo tras un año de exposición a los agentes atmosféricos. Además se realizó una visita a la zona de donde se extrajeron estas muestras para observar el grado de desintegración existente en los afloramientos. Se concluyó que para una de las muestras (L4) habían sido necesarios 11 ciclos de humedad – sequedad y para la otra (L9) habían sido necesarios 15 ciclos.

En la figura 2.5.1 se representa el índice de desintegración D_1 correspondiente a cada apertura de tamiz. Se observa que las curvas de las muestras ensayadas en laboratorio, L4(L) y L9 (L), son bastante concordantes a las curvas de las muestras recolectadas en el campo tras un año de exposición atmosférica, aunque hay que tener en cuenta que los procesos de envejecimiento en condiciones de frío-calor y de hielo-deshielo no se han aplicado en el laboratorio, mientras que en el campo si que han sido operativos.

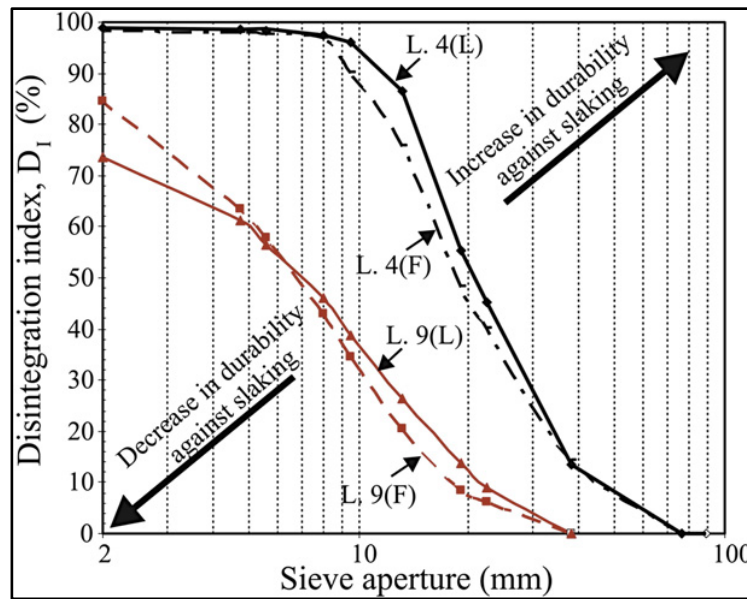


Figura 2.5.1. Comparación del Índice de Desintegración entre muestras ensayadas en laboratorio y muestras expuestas en condiciones de campo. Tomado de Erguler y Ulusay (2009).

Para definir cada una de estas curvas con un valor índice, Erguler y Ulusay (2009) proponen el Índice de desintegración medio, $D_{1(av)}$, calculado mediante la siguiente expresión:

$$D1(av) = D1(2mm) + D1(4.75mm) + \dots + D1(x\text{ mm})n$$

donde:

$D_{1(av)}$ es el valor del Índice de Desintegración Medio, calculado como la media aritmética de los valores del Índice de Desintegración, D_1 , correspondientes a las diferentes aperturas de tamiz que se muestran en la Figura 2.5.1.

x es la apertura de tamiz máxima.

n es el número de tamices empleados en el ensayo.

2.5.3 Ratio de desintegración (Erguler y Shakoor, 2009)

Erguler y Shakoor (2009) ensayaron 20 muestras de rocas arcillosas a las que les aplicaron de envejecimiento en condiciones de frío-calor, humedad-secado y hielo-deshielo. Concluyeron que para los ciclos de envejecimiento en condiciones de frío-calor no se producía una apreciable desintegración o desmoronamiento en las muestras. En las otras dos modalidades, humedad-secado y hielo-deshielo, aplicaron 20 ciclos de cada proceso a las muestras, obteniendo la curva granulométrica cada 5 ciclos, haciendo pasar la muestra con cuidado por los tamices de aberturas 50 mm, 25.4 mm, 12.5 mm, 6.3 mm y 2 mm, tal como se aprecia en la Figura 2.5.2.

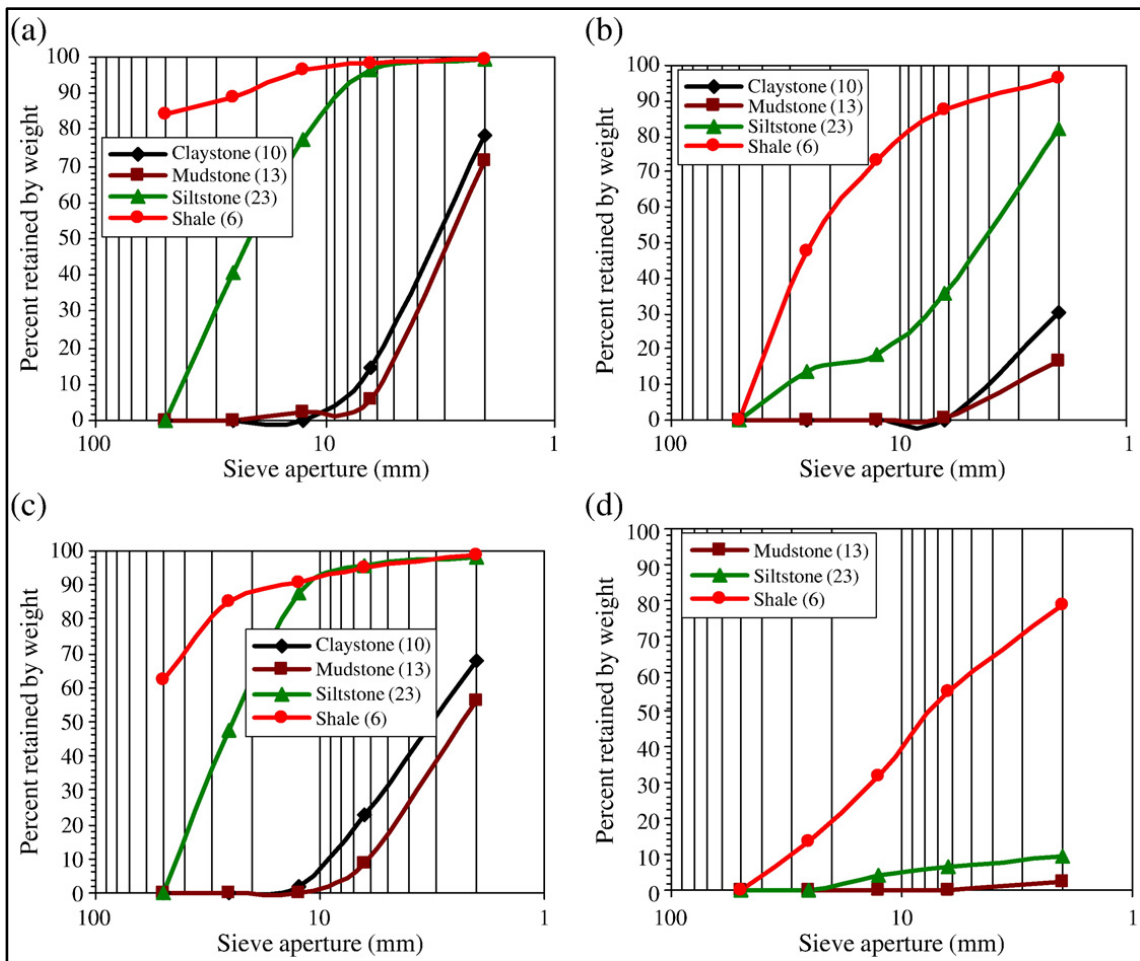


Figura 2.5.2. Curvas granulométricas de las muestras seleccionadas tras 5 (a) y 20 (b) ciclos de humedad-secado, y tras 5 (c) y 20 (d) ciclos de hielo-deshielo. Tomado de Erguler y Shakoor (2009).

Con el objetivo de encontrar relaciones y establecer relaciones empíricas entre el grado de desmoronamiento y las propiedades físicas de las muestras Erguler y Shakoor (2009) establecieron un parámetro denominado ratio de desintegración (D_R) calculado como el área bajo la curva granulométrica del material desintegrado respecto al área que abarca todas las curvas granulométricas de las muestras, de forma que:

$$DR = \frac{A_c}{A_T}$$

donde:

A_c es el área bajo la curva granulométrica

A_T el área que abarca todas las curvas granulométricas

La Figura 2.5.3 muestra un ejemplo del cálculo del ratio de desintegración a partir de las curvas granulométricas de varias rocas arcillosas tras 10 ciclos de humedad-secado.

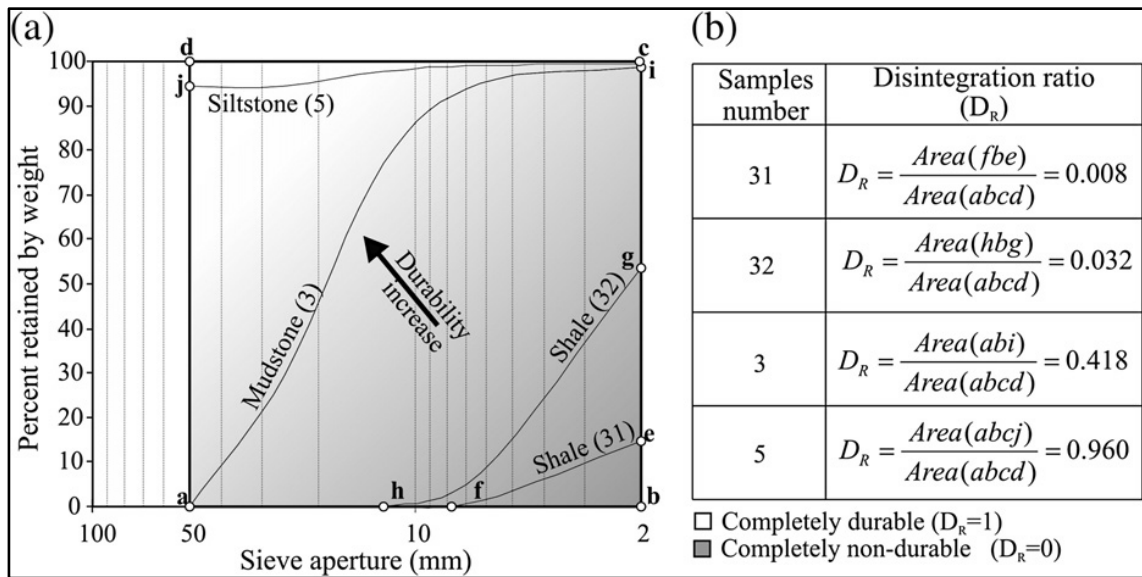


Figura 2.5.3. Curvas granulométricas de varias rocas arcillosas tras 10 ciclos de humedad -secado (a) y cálculo del ratio de desintegración (b). Erguler y Shakoor, 2009.

2.6 ANTECEDENTES DE INESTABILIDAD DE LADERAS EN ROCAS BLANDAS ARCILLOSAS

Olivier (1979) realizó una clasificación de la durabilidad de las argilitas, limolitas y areniscas aplicada a la construcción de túneles basándose únicamente en dos parámetros sencillos de obtener en laboratorio: la resistencia a compresión uniaxial (σ_c) y el coeficiente de hinchamiento libre de Duncan (ε_D).

Chigira *et al.* (2002) definieron un perfil meteorizado en taludes construidos en ignimbrita consistente en cuatro zonas, desde la superficie hacia la profundidad: zona desintegrada, zona exfoliada, zona hidratada y zona fresca.

Chigira y Yokoyama (2005) definieron un perfil meteorizado en ignimbrita disgregada consistente en tres zonas, desde lo más profundo a la superficie: una reblandecida pero no descolorida (IIa), una reblandecida y descolorida (IIb) y otra reblandecida y descolorida con abundantes bandas arcillosas.

Frydman (2007) realizó un estudio de un talud de con 15 ° de inclinación y concluyó que el deslizamiento producido en la interfaz entre el estrato superior compuesto de calizas fisuradas y en inferior compuesto de margas de alta plasticidad se desarrollaba más o menos paralelo a la superficie del talud.

Tu *et al.* (2009) realizaron un estudio de seguimiento de las infiltraciones ocasionadas por la lluvia en taludes construidos en loess observando que los taludes eran capaces de mantenerse estables durante la época lluviosa pero tendían a desmoronarse entre 3 y 6 meses después en la época calurosa.

La posición de la unidad rocosa socavada respecto la altura del talud es el factor que más influye en la profundidad total de socavación, seguido del espaciamiento entre junta de la unidad rocosa socavada (Admassu *et al.*, 2012).

Miščević y Vlastelica (2012) definieron dos formas básicas de inestabilidad de laderas en formaciones flysch compuestas principalmente por capas margosas: la exfoliación superficial del material meteorizado y el deslizamiento a lo largo de las juntas en las cuales se han desarrollado mecanismos de meteorización. La primera de ellas no afecta directamente la estabilidad global del talud, sin embargo modifica la forma del mismo haciendo que ese vaya “desapareciendo” a un ritmo de entre 2 y 8 cm por año. El segundo mecanismo puede provocar de forma indirecta la caída de bloques del material rocoso más duro debido a la erosión diferencial que se produce en estas formaciones flysch heterogéneas.

Generalmente las actuaciones estabilizadoras de las inestabilidades del Flysch de Alicante, no tienen en cuenta las inestabilidades derivadas de procesos de degradación/erosión, ni consideran al *raveling* y la erosión como un modo de fallo per se (Cano *et al.*, 2013).

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

El objetivo global de la presente tesis es la caracterización de las rocas blandas, evolutivas y arcillosas, que constituyen las Facies Tap del sur de la provincia de Valencia y de la mitad septentrional de la provincia de Alicante, tomando como punto de partida criterios de campo y ensayos habituales de laboratorio, que permitan predecir cuál será el comportamiento de los desmontes (asociados a obras civiles) que se construyan en este material a medio y largo plazo.

Para ello, necesitamos estudiar e identificar los componentes y parámetros de las rocas alterables que influyen en su proceso de degradación. En el apartado 2 se ha expuesto de forma detallada una síntesis de los distintos trabajos realizados por la comunidad científica al respecto, comenzando por analizar las inconsistencias que se han venido produciendo en cuanto a la clasificación y denominación de las rocas sedimentarias. Por otra parte se ha realizado una síntesis de los estudios realizados hasta la fecha de degradabilidad de rocas, centrando la atención en los resultados del ensayo Slake Durability Test.

En primer lugar, se ha constatado una notable dificultad para clasificar los sedimentos y rocas carbonato-arcillosas de forma correcta. En diversas publicaciones, tales como mapas geológicos e informes geológico-geotécnicos encontramos que los términos marga, limolita y argilita son utilizados como sinónimos, lo que añade una cierta confusión (Bofill, 2013). Además, los criterios utilizados para clasificar sedimentos, son en general diferentes a sus equivalentes en roca. Uno de los objetivos de esta tesis es establecer una clasificación clara de las rocas arcillosas que unifique la nomenclatura y defina las rocas de forma concreta teniendo en cuenta la granulometría, la textura, la composición y el grado de cementación.

El *Slake Durability Test* es el ensayo más utilizado para determinar la alterabilidad y degradabilidad de las rocas blandas. La revisión de los estudios realizados en los que se ha empleado dicho ensayo muestra la diversidad de opiniones existente acerca de cuál es el número óptimo de ciclos que hay que aplicar a las muestras para determinar correctamente la alterabilidad de las mismas. Por otra parte, se pone de manifiesto la existencia de ciertas debilidades en el ensayo. Se pretende con este trabajo, correlacionar de forma coherente los resultados obtenidos en el laboratorio con el comportamiento del material arcilloso expuesto a las condiciones atmosféricas a medio y largo plazo.

En base a estos antecedentes, a la recopilación de datos obtenidos en anejos geotécnicos de proyectos de obras lineales realizados en la zona de estudio y a los resultados de diversos ensayos geotécnicos realizados sobre muestras recogidas en taludes o terrenos correspondientes a las facies Tap, se pretende correlacionar la alterabilidad de las rocas con otros parámetros geotécnicos, con el fin de obtener la influencia de cada uno de ellos en la degradabilidad de las margas calcáreas que conforman estas facies.

CAPÍTULO 4. ÁREA DE ESTUDIO

4.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA

El área geográfica en que se enmarca esta tesis, se incluye dentro de la Cordillera Bética, orógeno alpino que se constituye como consecuencia de la colisión entre las placas Africana y Euroasiática. Esta gran unidad geológica que ocupa el sur y sureste de España, coincide con una gran unidad morfológica constituida básicamente por relieves montañosos que ocupan gran parte de Andalucía, la comunidad de Murcia completa, la parte meridional de la provincia de Albacete, la totalidad de la provincia de Alicante y el sur de la de Valencia (Estevez et al., 2004). De manera más concreta, nuestra zona se restringe al sector nororiental de la cordillera, abarcando el sur de la provincia de Valencia y la mitad septentrional de la provincia de Alicante. La topografía viene definida por una serie de sierras calcáreas de altitudes máximas comprendidas entre los 1000 y los 1500 metros, y de depresiones arcillosas en general alargadas y orientadas WSW-ESE (Santanach et al., 1986). Hidrográficamente, nuestra área de estudio está vinculada a la cuenca hidrográfica del Júcar, más concretamente a las cuencas fluviales del Serpis y de la Marina Alta. Cabe destacar de la primera que el fuerte grado de tectonización que existe en el área donde se ubica, ha dado lugar a una importante compartimentación de acuíferos. Las redes fluviales en este sector vienen condicionadas por estructuras de orientación bética. Como ejemplos tenemos el río de Cànyles, el río de Albaida, el río Serpis y el río Gorgos. La economía de la zona de estudio está claramente dominada por los cultivos de interior y por la industria, con una larga tradición en las industrias del textil y el papel. Las principales carreteras que atraviesan esta área geográfica son, en el interior, la denominada autovía del Mediterráneo o A-7 y, con más proximidad a la costa, la autopista del Mediterráneo o AP-7 y paralela a esta la N-332.

Los puntos seleccionados de los cuales se ha extraído material alterado para la realización de ensayos geotécnicos se muestran en la Figura 4.1.1.

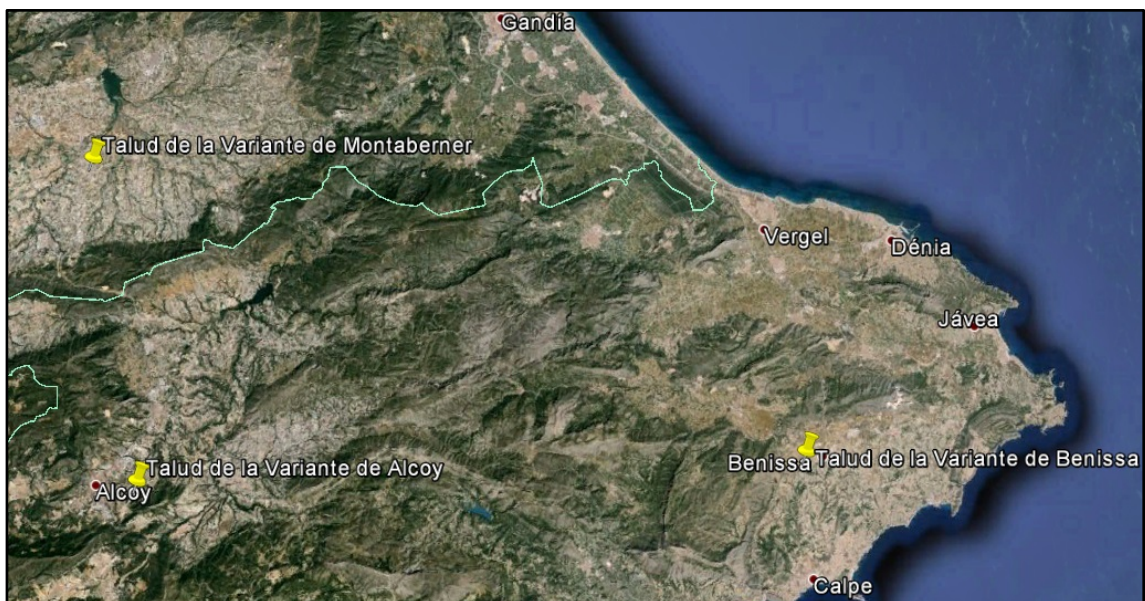


Figura 4.1.1. Taludes seleccionados.

4.2 CLIMATOLOGÍA

La climatología de nuestro sector de estudio es típicamente mediterránea, caracterizándose por una sequía estival causada primordialmente por la marcada preponderancia durante esta estación de altas presiones en altitud e inversiones de subsidencia que detienen los ascensos. Este hecho, que se puede generalizar para toda el área de estudio no es obstáculo para que se tengan en cuenta otros factores del relieve, distancia del mar y situación particular que confieren personalidad climática a cada uno de los ámbitos que se pueden encontrar; la franja litoral, el área montañosa y el interior (Gil, 1994).

Resulta llamativa la temperatura media anual relativamente alta de este sector costero (Gandía 18° C), fruto de la combinación de un invierno muy benigno, con 11 °C en enero y mínima media para este mes de 6.3 °C, y de un verano caluroso (agosto 26.5 °C); las heladas no son frecuentes y aún lo son menos las nevadas. Este condicionamiento térmico fue en otra época la premisa física del cultivo lucrativo de la caña de azúcar en la huerta de Gandía. Sobresale, de igual manera el notable incremento de las precipitaciones, gracias a la existencia de vertientes elevadas expuestas a los vientos del primer y del segundo cuadrante, y también a una posición avanzada sobre el Mediterráneo que propicia una mayor incidencia de las depresiones, con o sin frontogénesis, generadas en el área balear; Gandía y Denia alcanzan la media de 700 mm anuales y Pego la supera ampliamente (816 mm), el mínimo hibernal se difumina y abre paso a un escalón primaveral, a partir del cual en fuerte declive desciende hasta julio (Gandía 9 m, Pego, 9 mm) para repuntar en agosto, particularmente en la segunda mitad del mes que prelude al otoño.

Es necesario señalar que los diluvios que superan el umbral de los 150 mm/24 horas y, en particular, los superiores a 200, en las tierras valencianas meridionales muestran una clara preferencia por las comarcas de la Safor y el Marquesat, seguidas a distancia por la zona montañosa de Alcoy. Estos datos revelan el papel de percutor que tiene el relieve para el inicio en la vertical de las masas sumamente húmedas e inestables. Estas, conducidas por vientos del primer o el segundo cuadrante en un área de depresiones o de borde de anticiclón, experimentan, para salvar las alineaciones litorales o pre-litorales, una convección forzada que inicia el ascenso del aire supramediterráneo hasta la misma tropopausa.

ESTUDIO TERMOMÉTRICO													
ESTACIÓN E-8059 – ALCOY-CONCENTAINA “P.BOMBEROS”													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL
T. MEDIA	7.7	8.9	10.6	12.4	16.1	20.2	24.1	24.1	20.6	15.5	11.2	8.4	14.9
T. MAXIMA ABSOLUTA	19.3	21.5	24.4	25.5	29.2	33.8	37.9	37.1	33.0	27.7	22.6	19.9	27.7
T. MAXIMA MEDIA	12.3	13.7	15.9	18.0	22.0	26.6	30.9	30.8	26.8	20.6	15.9	12.7	20.5
T. MÍNIMA ABSOLUTA	-2.4	-2.0	-0.2	1.8	5.2	8.9	12.5	12.9	9.5	4.8	1.1	-1.6	3.9
T. MÍNIMA MEDIA	3.1	4.0	5.3	6.9	10.2	13.8	17.2	17.4	14.4	10.4	6.6	4.1	9.6

Tabla 4.2.5. Estudio termométrico de Alcoy. Casaseca y Moreno, 2003.

El contraste de la franja costera con la montañosa de Alcoy es, sobretudo, térmico, ya que el incremento de altitud refresca el verano y, sobre todo hace más duro el invierno. Las medias

Capítulo 4. Área de estudio

anuales quedan alrededor de los 15 grados (Tabla 4.2.1), consecuencia de veranos más suaves (24°C en los meses de julio y agosto) y del frío hibernal con una temperatura media de 8 °C en el mes de enero (Figura 4.2.1); el periodo habitual de heladas incluye de noviembre a abril, aunque pueden anticiparse o retrasarse (Figura 4.2.2).

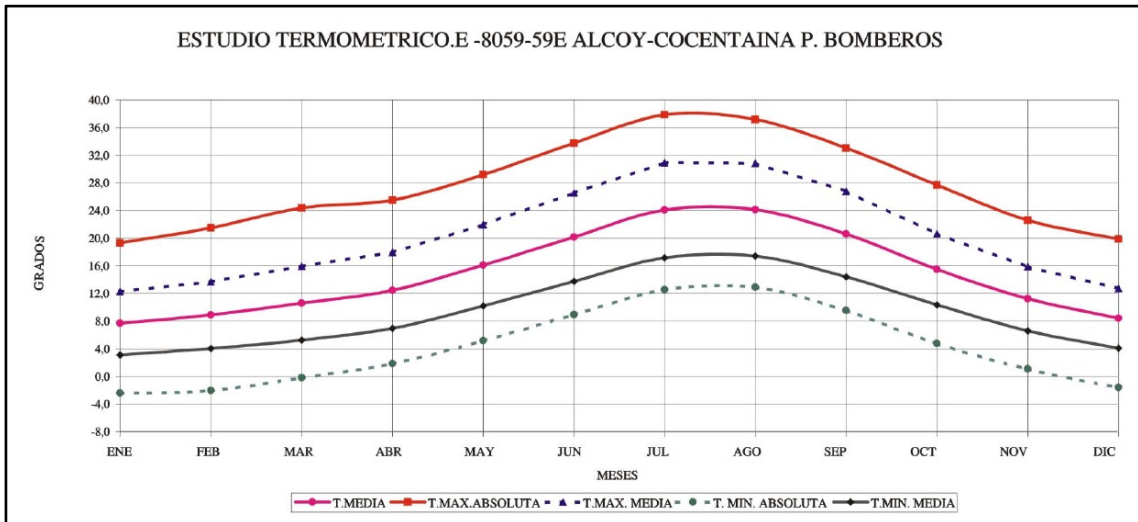


Figura 4.2.3. Estudio termométrico de Alcoy. Casaseca y Moreno, 2003.

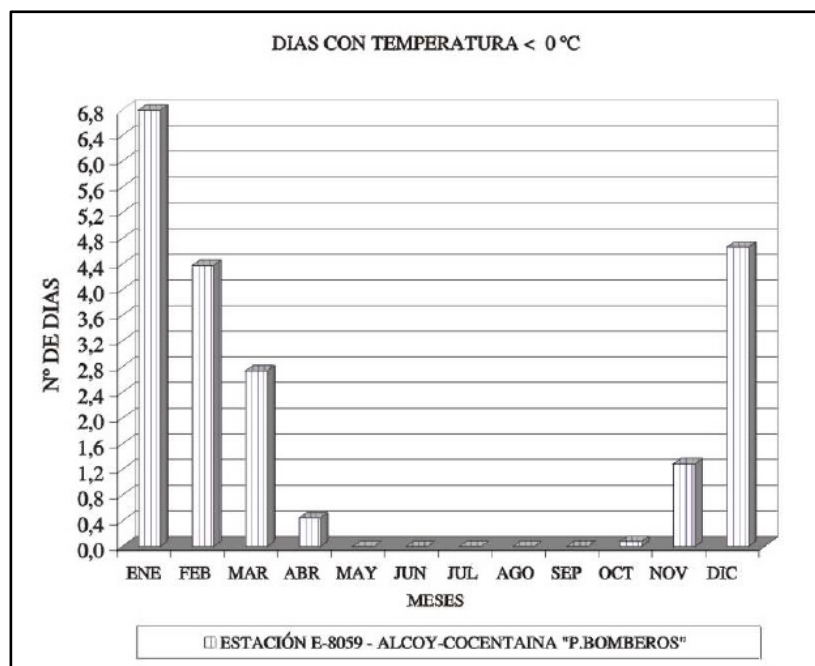


Figura 4.2.4. Gráfica de los días con temperatura < 0 °C. Casaseca y Moreno, 2003.

La precipitación media anual varía mucho de unos sectores a otros condicionada por la altitud y, en particular, por la exposición a los flujos pluviosos; así, mientras municipios como Alcolecha exceden ligeramente los 700 mm y en el pantano de Beniarrés se recogen casi 650 mm; en Alcoy con 483 mm (Tabla 4.2.2) y en Bañeras no se alcanzan los 500 mm. El máximo de octubre, o septiembre en algún caso, supera los 60 mm en casi todos los observatorios y queda cerca del centenar, superándolo en algunos casos; después del máximo del otoño, el

Capítulo 4. Área de estudio

invierno es muy lluvioso, con ápice en diciembre, mínimo secundario poco acentuado en enero o febrero y un máximo secundario en mayo, con un descenso profundo en julio (Alcolecha, 4 mm; Alcoy, 11 mm). Destaca también la incidencia notoria de las tormentas (alrededor de 10 anuales), propiciada por el relieve; y, a diferencia de la costa y por efecto básico de la altitud, las nevadas (4-7 días/año), poco copiosas en general, no constituyen una excepción.

PRECIPITACIONES TOTALES MEDIAS (mm.)													
MESES													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
E-8059E ALCOY- CONCENTAINA P.BOMBEROS	49.2	45.5	46.4	45.9	45.1	30.1	10.7	12.0	34.0	69.6	56.0	59.0	483.3

Tabla 4.2.6. Precipitaciones totales medias en Alcoy. Casaseca y Moreno, 2003.

Climáticamente El Alto Vinalopó es una comarca de transición entre la Meseta y la región árida del sureste peninsular. Debido a su situación en el interior y, secundariamente a su altitud, el invierno es más frío, de manera que las mínimas medias de enero están ligeramente por encima de los 0 °C y la media del mes se sitúa alrededor de los 6 °C; la media anual no alcanza los 15 °C y julio y agosto se mantienen por debajo de los 24 °C amortiguadas las máximas medias (31 ° - 32 °C) por la fuerte irradiación nocturna. La precipitación media anual en casi ningún observatorio sobrepasa los 400 mm; el máximo más destacado se produce en otoño, en el mes de octubre (Villena, 45 mm), aunque a poca distancia de los máximos de abril y mayo (Villena, 44 mm). A pesar de la relativa suavidad del verano, la dureza del invierno, similar a la de la zona de Albacete, sitúa en 18 °C la amplitud térmica anual.

4.3 SITUACIÓN GEOLÓGICA

4.3.1 El relieve actual de la provincia de Alicante

4.3.1.1 Introducción

La configuración geológica de la provincia de Alicante está muy ligada a los acontecimientos geológicos, dado que la provincia de Alicante se encuentra totalmente dentro de la Cordillera Bética, orógeno alpino que se constituye como consecuencia de la colisión entre las placas Africana y Euroasiática (Estevez *et al.*, 2004).

En las Zonas Externas de la Cordillera Bética, dentro de la mitad septentrional de la provincia de Alicante se encuentran numerosas sierras tales como la Sierra de Mariola, la Sierra de Aitana, la Sierra de Serrella, la Sierra de Alfaro, la Sierra de Salinas y la Sierra de Peñarrubia. Orogénicamente estas sierras son grandes anticlinales dispuestos en la dirección bética que están separados por sinclinales de la misma dirección.

Las Zonas Internas de la Cordillera Bética ocupan la mitad sur de la provincia de Alicante. En este sector, de actividad sísmica moderada, aparecen multitud de fallas activas, muchas de las cuales al no tener ruptura en superficie, se manifiestan como pliegues activos que deforman rocas de edad Mioceno Superior hasta el Cuaternario.

Uno de nuestros puntos de estudio se sitúa en los valles de Alcoy, en el extremo NE del dominio prebético, entre una serie de alineaciones calizas orientadas de SW a NE y separadas por estrechos valles rellenos de margas miocenas. Su estructura tectónica es sencilla; en su extremo occidental consta de una serie de pliegues regulares o en cofre con vergencia NW que hacia el E pasan a escamas tectónicas, todo ello en materiales cretácicos. El conjunto está alterado por tres sistemas de fallas: fallas inversas en los flancos N de los pliegues, fallas normales de distensión en los flancos meridionales y fallas de desgarre que los seccionan (Bernabé, 1975).

La orogénesis de la zona está afectada por una antigua polémica sobre la magnitud de los desplazamientos que han sufrido los pliegues: se admite la existencia de un nivel incompetente de arcillas triásicas sobre el que han podido producirse algunos movimientos limitados, gracias al empuje de los materiales de zonas más interiores o bien por el basculamiento de los bloques rotos del zócalo.

Podríamos definir esta área como una fosa tectónica situada entre las alineaciones cretácicas (Mariola, Agullent) y las escamas tectónicas, y entre el Benicadell y la serie eocena del Prebético interno, formando un amplio valle, transversal a la estructura, recorrido por el Río Serpis.

Si la erosión no ha sido capaz de modificar significativamente la estructura en los materiales duros, no ha ocurrido lo mismo con las margas. Estos materiales blandos están afectados por oleadas erosivas que han quedado atestiguadas por llanos colgados a distintas alturas, terrazas, encajamientos de los ríos, etc. La diversidad es tan grande que no podría explicarse sólo por cambios climáticos o de nivel de base.

4.3.1.2 Litología

Sobre el Cretácico de los sinclinales se deposita una serie aquitaniense formada por calizas detríticas marinas con intercalaciones margosas, que en algunos puntos están sustituidas por conglomerados en alternancia con capas de arcillas rojas de origen continental. Encima se deposita una capa de molasas marinas y seguidamente una potente serie de margas de edad burdigaliense-vindobondiense. Estas margas en profundidad tienen un tinte azulado con fractura concoidea (tap azul), pero las capas superiores están formadas por margas blancas con intercalaciones arenosas de origen marino que en altura pasan a lacustres. La distinción entre las margas marinas y lacustres, a pesar de la diversidad de sus condiciones de sedimentación, es muy difícil de hacer sin un estudio de los fósiles (Bernabé, 1975).

Niveles lacustres formados por pudingas de cantos que alternan con capas de arcillas algo arenosas pueden verse, desde Concontaina a Alcoy, fuertemente plegados. Capas de margas oscuras en alternancia con niveles de areniscas se encuentran de Turballos a Gaianes en las trincheras del ferrocarril al S de Benimarfull, también en la subida al Calivet – generalmente coronadas por potentes costras calizas – y entrada al Valle de Agres. Darder señala entre Margarida y Planes unas margas algo amarillentas, de origen lacustre, sobre el tap marino en discordancia poco apreciable.

El mismo autor observó además que, con frecuencia, sobre las margas marinas blancas aparecen formaciones de margas rojo pálido, lacustres, plioceno-pontienses, a veces con discordancia angular variable, a veces sin ella. Con frecuencia engloban una pudinga muy suelta. Darder localizó esta formación en la margen derecha del Río de Benilloba desde la carretera, fuertemente discordante sobre el Mioceno. Esta capa puede apreciarse también en la carretera de la Alcúdia a la Alquería con 3 a 4 m de potencia y buscando 3-4° al SW por encima de capas de margas vinosas, probablemente triásicas resedimentadas. Frente a la Alquería puede volverse a apreciar esta formación; el río secciona los depósitos dejando a la vista un corte de unos 50 m que empieza con niveles de margas blancas con intercalaciones arenosas más consistentes y niveles oscuros, siguen las margas rojizas ligeramente discordantes y termina con conglomerados, costra y suelo rojo. El conjunto buza unos 6-7° hacia el NW, es decir hacia Muro, pero la discordancia angular afecta a toda la serie. Mas al S, al pie de Terratge, el río vuelve a descubrir las margas rojizas en fuerte discordancia sobre el Mioceno y a su vez cepilladas por la erosión posterior.

Hacia Concontaina, encima de las margas, se han depositado materiales cuaternarios con un espesor superior a los 25 m, formados por brechas más o menos cementadas que se intercalan con niveles de arcillas rojas, como se puede apreciar en el Barranco de Casa de Herrera, Barranco de Fraga o en el Barranco de Fontanelles que los tajan verticalmente. En el Barranco de Fontanelles comienzan con un lecho de gravas redondeadas de unos 10 m de potencia, siguen arenas ocres (2 a 3 m) y terminan en series alternas de arcillas con concreciones calizas de tono rojo y brechas, coronadas por una costra caliza de unos 50 cm, cubierta por un suelo rojizo pedregoso. Todo el conjunto buza 5-6° hacia el SW a la altura de la Alcúdia; tal inclinación aumenta progresivamente, alcanzando los 18° en el borde del encajamiento del Río de Alcoy (Serpis). Este nivel de conglomerados puede apreciarse más al N, en el pueblo mismo

de la Alcúdia y en la colina, al otro lado del Barranco de Pont Tallat (380, 410 y 425 m en una distancia que no alcanza el kilómetro).

4.3.1.3 Tectónica

La deposición de estos materiales fue en muchos casos sinorogénica; de ahí los cambios laterales de facies y las discordancias angulares. Según el Mapa Geológico (1957) los materiales miocenos se encuentran en toda la zona buzando hacia el SSE hasta una línea de Alcoy a Millena que señala la dirección del sinclinal, seguido del anticlinal del Ull del Moro que torcería por el Salt y Tossal del Moro hasta empalmar con la Serrella. Darder señala el Mioceno buzando fuertemente hacia el W en el Río de Benilloba; lo mismo ocurre en el espigón de la fábrica de papel de les Serrelles, donde buza 30° W y desaparece bruscamente bajo los depósitos de gravas y limos de la zona de Concentaina; también más al S, en Terratge, se hunde unos 15° NW. Por otra parte los cortes ya citados del Barranco del Pont Tallat señalan un buzamiento general hacia el W, incluso en materiales recientes, que hacia el borde del Río de Alcoy se agudiza fuertemente. Más al S, junto a la confluencia del Barranco de la Casa de Herrera y el Río de Alcoy, puede apreciarse un fenómeno semejante, como también en la subida a la loma de Alberri. Resumiendo, parece existir un buzamiento general de los materiales miocenos hacia el W, que afecta incluso a los sedimentos recientes; este buzamiento parece tener una brusca inflexión en algún punto cercano al río, pues es aquí donde las capas aparecen con la máxima inclinación, para volver a reaparecer en el escalón Concentaina- Alcoy, pudiéndose tratar de una fractura profunda (Bernabé, 1975).

Aparte de este fenómeno se aprecia un buzamiento generalizado hacia el N, exactamente contrario al que figura inexplicablemente en el Mapa Geológico. Los buzamientos del mapa citado parecen haberse medido a lo largo de la carretera de Planes a Millena por lo que respecta al Mioceno, mientras que nuestras mediciones se hicieron a lo largo del encajamiento del Río de Alcoy, unos 4 km al W; es posible, además, que los materiales aquí estudiados no sean tan poco los mismos, dada la dificultad de distinguir las margas miocenas de las pliocenas y las fuertes discordancias entre unas y otras. Al N de la zona los materiales lacustres antes reseñados aparecen con una pequeña inclinación hacia el W a lo largo del ferrocarril entre Turballos y Gaianes, pero al S de Mas Alfafar y de Gaianes presenta fuertes hacia el S.

Todo parece señalar la existencia de una depresión entre Muro y Alcosser, quizá una prolongación del sinclinal de Agres.

Al lado derecho del río, entre éste y la Sierra de Almudaina hay también bastante complicación: a la altura de els Tossals de Benillup, el Barranco de la Caradita secciona más de 100 m de capas alternantes de margas blancas y areniscas, todas ellas subhorizontales o con un ligero buzamiento hacia el W. El descenso desde el Calivet muestra con frecuencia los niveles de arenisca, normalmente buzando hacia el W, aunque con inclinación muy variable, a veces incluso horizontales.

Capítulo 4. Área de estudio

Al S de la zona puede verse el Plioceno subhorizontal a la derecha del Río de Benilloba y buzando fuertemente hacia el N a su izquierda; probablemente se trata de una fractura profunda.

Todas estas consideraciones nos llevan a pensar no sólo en plegamiento, sino también en fracturas, al menos de los materiales duros infrayacentes que han podido reflejarse en los blandos. Tanto el flanco occidental de la Serra de Almudaina como el oriental de la Mariola están afectados por sendas fallas, que, sin duda, se prolongan más allá de los anticlinales estrictos; de hecho esto ocurre en muchos puntos. Es muy conocida la profunda alteración de las series pliocenas producidas por la gran falla Alcoi-Concentaina.

Las tres alineaciones occidentales, Mariola, Serreta de Alcoi y Sierra de Benifallim, terminan sus anticlinales siguiendo una línea NW-SE, que en los materiales duros ha sido señalada como fractura, según la hipótesis de García Rodrigo (1960), de desgarre con avance del labio W sobre el E. Así pues, la continuación de la falla de Concentaina sería el escalón que bordea el camino Concentaina-Benilloba y explicaría las colinas del margen izquierdo del Río de Penáguila hasta esta población en que empalmaría con la falla citada; hacia el SW otra fractura paralela estaría seguida por el Barranco de les Penelles y produciría un pequeño escalón en el Río de Alcoi a su desembocadura.

Esto sugiere otra posibilidad: que estas fracturas hayan actuado en tiempos muy recientes, pues sólo así podría explicarse el brusco cambio de pendiente del río en materiales blandos. El anticlinal de la Serreta, según el Mapa Geológico, forma una inflexión hasta empalmar con la Serrella, lo que es característico de la terminación periclinal de estos anticlinales, produciendo un importante encajamiento del Río del Pinar que sugiere otra vez movimientos recientes. Los ejemplos de éstos en la Vall de Ceta son frecuentes.

Utilizando el Río de Alcoi y el Barranco de la Caradita como ejes, pueden individualizarse cuatro grandes zonas: Un bloque al SE levantado, con ríos fuertemente encajados, inclinado hacia el W, y un bloque al NE hundido y buzando hacia N o NW. Al SW la zona de subsistencia de Concentaina, cubierta por conglomerados y arcillas, de modo que los barrancos no llegan a cortar la base de las margas. Hacia el N el substrato asciende y en la Alcúdia aflora el Mioceno. Desde este punto hasta Muro se forma un escalón que no parece fácil de explicar. El Mapa Geológico señala el Plioceno en la parte alta y el Mioceno en el frente y parte de la baja, estando el resto cubierto por el Cuaternario. Sin embargo, dada la altura y el buzamiento de las capas miocenas frente al meandro de la Alquería, esto no parece posible, salvo que se suponga un cambio de inclinación. Además los barrancos cortan en la parte baja del escalón unas margas rojizas semejantes a las que coronan las margas al otro lado del río, y al igual que allí aparece debajo el Mioceno, lo que sí es coherente con su posición y buzamiento al otro lado. Esto hace suponer una inflexión en los materiales al pie de este escalón y que precisamente aquí termina el buzamiento generalizado hacia el W, produciéndose una línea de subsidencia que señala posiblemente una fractura profunda.

4.3.1.4 La evolución de la red fluvial

Dentro del dominio bético, el Prebético externo (tierras valencianas meridionales y alicantinas septentrionales) tiene características litológicas muy parecidas a las del dominio bético, mientras que el Prebético interno y el Subbético (de la sierra de Mariola hacia el S) se caracteriza porque, desde el Triásico hasta el Mioceno, los sedimentos se depositaron en un medio de mar abierto, en una cuenca que se hacía más profunda en dirección S; hay, por lo tanto, un predominio de depósitos margosos, con intercalaciones calcáreas y con grandes potencias de sedimento. Las cuencas de los ríos del área se instalan en dos tipos de materiales: las partes elevadas lo hacen sobre roca calcáreas, y las partes bajas, sobre materiales blandos, generalmente arcillas y margas; la disparidad entre crestas de roca calcárea y valles de roca margosa está presente en el centro y la mitad N de la provincia de Alicante, y también en algunos sectores de la mitad meridional (Guimerà, 1992).

Se cree que ha habido diferentes tipos de estructuras geológicas (anticlinales, sinclinales, fracturas, extrusiones, fosas tectónicas, etc.) que han condicionado el trazado de las arterias principales de la red fluvial en la Comunidad Valenciana, ya que esta tiene un grado de desarrollo débil. No obstante, es necesario considerar el componente estructural de la red valenciana a diferentes escalas. A gran escala, se observa un predominio estructural fuerte en el trazado de las cuencas. En nuestra área de estudio tenemos excelentes ejemplos de este predominio como son las redes condicionadas por estructuras de orientación bética: el río de Canyoles, el río de Albaia, el río Serpis, el tramo superior del Vinalopó y el río Gorgos (Guimerà *et al.*, 1992).

En el área correspondiente a nuestro punto de estudio (Alcoy) la red de drenaje está formada, a grandes rasgos, por una serie de cursos NE-SW capturados desde el N, aprovechando los descensos de eje y fracturas perpendiculares a los anticlinales. La disposición de la red a nivel de detalle parece menos dominada por la estructura, lo que plantea problemas de ríos inadaptados, encajamientos epigénicos. Por otra parte, la escorrentía ha debido desembocar en espacios lagunares por lo menos hasta el Plioceno; en algún momento dichas lagunas puede que fueran endorreicas, hasta que las corrientes han ido cortando los anticlinales. Cada una de las cuencas debió de crear superficies de erosión relacionadas con el nivel de base local: en el Pla de Muro la superficie está situada a unos 450 m, aunque localmente varía, posiblemente por haberse desnivelado posteriormente los bloques seccionados por fallas.

En la Vall de Ceta se halla, sin embargo, alrededor de los 600 m; puede apreciarse además pequeños retazos colgados a unos 700-750 m de altitud que posiblemente son restos de un antiguo nivel de erosión, lo que podría explicar el encajamiento del Río de Millena por superposición. Las superficies están violentamente alteradas, y no sólo por la acción de la oleada de erosión regresiva: la mitad izquierda de la Vall de Ceta está profundamente diseccionada por los ríos en un caos de valles muertos encajados, capturas, etc., al S de una línea desde Fageca a Gorga, con toda la seguridad una línea de fractura; por el contrario, la cuenca apenas ha sido alterada al N, donde debería haber una cierta subsidencia relativa. Algo semejante ocurre al extremo SW del Pla de Benilloba, donde la falla, que separa el Pinar de Sanxis de l'Ull del Moro, se incurva por el E de l'Altet del Regadiuet drenando una zona elevada

con brutales encajamientos. También la disimetría afecta la margen derecha del Río Serpis, donde el Plioceno alcanza alturas de unos 100m por encima de la orilla izquierda, con una pendiente muy superior (7%) (Bernabé, 1975).

4.3.2 El mioceno en la Comunidad Valenciana

Los sedimentos de edad terciaria o cenozoica de la Comunidad Valenciana provienen de un origen distinto según su localización. Mientras en el norte de la Comunidad Valenciana y en zonas interiores predomina la génesis continental, en el sur de ésta los sedimentos de edad terciaria tienen predominantemente un origen marino (A. Moralejo, 2011).

El Mioceno ha sido una época de gran actividad orogénica en la Comunidad Valenciana. A continuación se expone una síntesis de los principales fenómenos que ocurrieron durante sus pisos inferior (Aquitaniense-Burdigaliense), medio (Langhiense-Serravallense) y superior (Tortoniense-Messiniense) que han tenido una gran importancia en la configuración geológica actual de la Comunidad Valenciana.

Durante el Mioceno Inferior, las aguas marinas se retiraron definitivamente del territorio y el continente, tras lo cual una intensa erosión fosilizó un relieve todavía bastante acentuado. Posteriormente se deposita una primera etapa detrítica a la que sucedieron depósitos carbonatados de agua dulce.

Durante el Mioceno Medio destacan los fenómenos de plegamientos de series de la Plataforma Prebética.

Durante el Mioceno Superior la mayor parte de la provincia de Alicante y la zona sur de la provincia de Valencia, entonces emergidas, son invadidas por las aguas miocenas. Actúa entonces, y también durante el principio del Plioceno, una fuerte erosión sobre la potente capa detrítica del Pontienense.

El Mioceno pretectónico y sintectónico en el sur del País Valencià

Está constituido por dos conjuntos de materiales que forman dos unidades tectonosedimentarias. Corresponden, en edad, al Aquitaniense-Burdigaliense y al Burdigaliense-Languiense, respectivamente. La primera unidad se sitúa al NW del área, discordante sobre depósitos mesozoicos, mientras que hacia al SE lo hace muy frecuentemente concordante sobre depósitos del Oligoceno superior; las facies oligocenas y las del Mioceno basal acostumbran a ser muy iguales y se pueden distinguir únicamente por la fauna. La segunda unidad está formada por materiales predominantemente margosos, conocidos en la región por tap azul; en el techo pueden encontrarse depósitos calcareníticos bien sedimentados que indican una etapa regresiva de tránsito al Mioceno medio-superior. En el extremo más meridional, al W de Crevillente, es posible distinguir unidades miocenas alóctonas que presentan materiales un tanto diferentes de los considerados autóctonos o paraautóctonos (Guimerà *et al.*, 1992).

La unidad basal

La unidad basal (Aquitaniense-Burdigaliense) aflora en una franja que se extiende desde la sierra de Crevillente hasta la sierra de Segura, al W de Dénia. En las zonas NW predominan los depósitos calcáreos con algas, más o menos terrígenas, mientras que hacia el SE los materiales suelen ser más margosos. Es posible distinguir un área alóctona, al W de Crevillente, con depósitos calcareníticos potentes, de las zonas autóctonas o paraautóctonas, en las que predominan las secuencias bioclásticas de poco grosor.

Uno de los depósitos más característicos de la unidad basal miocena son las Calcáreas con algas y amfisteginas. Afloran en la sierra de Fontanella, donde producen una barra blanca muy visible, que destaca morfológicamente y tiene un grosor de entre 10 y 20 m. Se trata de calcarenitas muy bioclásticas y calcáreas paraescullosas. La base se dispone con una ligera discordancia angular, tiene carácter erosivo sobre los materiales mesozoicos y contiene abundantes componentes detríticos. Los componentes bioclásticos más abundantes son los fragmentos de algas (melobesias, Lithothamnium), las amfisteginas, los briozoarios y los coralarios; también están presentes moluscos y equinodermos.

Al S de la sierra de Mariola (las Canteras), cerca de Alcoi (ermita de Sant Antoni), también afloran las calcáreas con algas y amfisteginas que contienen, además, Operculina complanata; se sitúan discordantes sobre materiales oligocenos y, como sucedía en la sierra de Fontanella, se cuñan hacia el NW i no afloran en las áreas de Ontinyent ni en el río Canyoles. En cambio, si que se encuentran en Carrícola, al E de Albaida, donde presentan un considerable grosor de calcáreas arenosas (120 m). Muestran bancos centimétricos con fauna de globigerínidos. Aunque los datos paleontológicos no son concluyentes, estas calcáreas se sitúan por debajo de las margas de la unidad burdigaliense-laguiense: por eso se considera que pertenecen a la unidad basal. Más aún hacia el NE estas facies pasan a conglomerados calcáreos en alternancia con margas y depósitos calcáreos.

Las facies terrígenas de la unidad basal miocena aparecen también en la sierra de Segura, al W de Dénia, y a las proximidades de Ibi. A la sierra de Segura afloran entre 150 y 200 m de conglomerados monogénicos con cemento calcáreo, que pueden pasar lateralmente a calcarenitas bioclásticas. En los Molinos (Ibi), están formadas por calcáreas margosas y margas calcáreas con un porcentaje de gres, con intercalaciones de calcáreas bioclásticas. Lateralmente pasan a calcarenitas y microconglomerados. En este último caso, como sucedía en Albaida, los datos paleontológicos no son concluyentes, y la posición estratigráfica de estos materiales, que se sitúan por debajo del tap burdigaliense-laguiense, no ha sido correctamente determinada.

La unidad basal también aflora en áreas más hacia el SE. Presenta depósitos calcareníticos (sierra de Bérnia) o calcáreas con algas y amfisteginas (Xixona y sierra del Sit). El grueso se sitúa, entre 5 y 30 m y siempre están recubiertas por los depósitos del Mioceno transgresivo.

Finalmente, los depósitos más meridionales de la unidad basal están formados por calcarenitas más o menos macizas y de gran potencia (200-250 m) que afloran en el flanco S de la sierra de

Capítulo 4. Área de estudio

Crevillente. Contienen Miogypsina, Nephrolepidina, Amphistegina, Operculina, Planorbulina y briozoaris. Estos sedimentos son considerados alóctonos.

Los afloramientos descritos no permiten hacerse una idea clara de la paleogeografía de la zona. Parece definirse un área sin deposición en dirección NW, mientras que hacia el NE se definen áreas con influjo terrígeno importante. El resto de la zona, exceptuando las unidades alóctonas del SW (Crevillente), presenta un predominio de las facies de calcáreas con algas y amfisteginas, influidas localmente por aportaciones terrígenas, ocasionalmente predominantes. El conjunto debía constituir un área de plataforma proximal donde predominaba una sedimentación carbonática con mayoría de algas rojas; el relieve debía ser localmente importante y el clima, entre templado y cálido.

La unidad burdigaliana-languiana

Estos materiales presentan facies margosas, conocidas popularmente por tap o tap azul, que llegan localmente a superar los 1000 metros de potencia. Los afloramientos de esta unidad se sitúan al fondo de muchos valles, que son generalmente utilizados para cultivo. Se trata de series monótonas de margocalcáreas y margas en capas de poco espesor, regulares, pero con escasos intervalos gresosos; a veces se intercalan niveles de silexitas. Los materiales afloran con colores amarillentos y blanquecinos, mientras que en fractura fresca o en sondeo son azules.

Al NW, estos materiales predominantemente margosos se vuelven más toscos y se intercalan con niveles calcareníticos. Así, al W de Crevillente (Monte Alto) afloran depósitos calcáreos y fresosos que llegan a 500 m de potencia. En el Tabaiá se intercalan margas gresosas y margas blancas que, verticalmente, desaparecen dando lugar a greses macizos. En la sierra de la Ombría esta unidad tiene calcarenitas bioclásticas entre las que se intercalan niveles margosos; estos depósitos margosos pasan a ser predominantes hacia el SE, donde se presentan las clásicas margas blancas del *tap*; más hacia el SE aún, tienen carácter *tap* o *flyschoide*. En Castalla afloran las facies margosas típicas, monótonas y poco limosas, con potencias superiores a los 300 m; contienen abundantes foraminíferos (*Praeorbulina*, *Orbulina*, *Globigerinoides*, *Globorotalia*, *Globoquadrina*). Al N de Ibi (los Molinos) las mismas facies margosas llegan a los 170 m. Al N de Xixona (a la sierra de la Carrasqueta), encima de unos 300 m de materiales margosos se intercalan niveles calcareníticos que, bruscamente, se hacen predominantes y llegan hasta los 170 m de calcáreas detríticas y microconglomerados con guijarros blandos; estos depósitos tienen una estratificación muy regular, en bancos de pocos decímetros de espesor, y están afectados por una fisuración poco penetrativa, que les da un aspecto de escama de pez, similar al de las calcarenitas de Randa, en Mallorca.

En el resto de la región son mayoritarias las secuencias margosas. En la sierra de Mariola se encuentran hasta 300 m de margas blanquinosas, poco limosas, que contienen microfauna de foraminíferos del Languianense inferior (zonas N8-9 de Blow). Hacia el NW el espesor de la unidad decrece muy rápidamente. En la Serrella los materiales presentan también facies de tap y contienen globigerinas, globigerinoides y globocuadrinas. En el N, en la cuenca de Albaida, el espesor del tap supera los 1000 m y también contiene asociaciones de

foraminíferos del Burdigaliense terminal – Languianense inferior. Al NE, en la sierra de Segura, las margas blancas más o menos arcillosas son de edad languiana y llegan a los 200 m de grosos. En el E, en la cuenca que se desarrolla entre Benissa y Xàbia, también se superan los 1000 m de margas blancas del tap que, aquí, se intercalan con niveles calcareníticos.

Por tanto, la unidad burdigaliana-languiana se caracteriza por depósitos predominantemente margosos que rellenan surcos de diversos grados de subsidencia y recubren buena parte de la paleotopografía dejada por la unidad anterior (unidad basal) después de haber experimentado un proceso de subsidencia y transgresión. Únicamente en el SW y, posiblemente también, en el E, los depósitos calcareníticos rompen el predominio de los sedimentos margosos pelágicos y hemipelágicos. La secuencia transgresiva representa, por tanto, el ahondamiento de la anterior zona de plataforma y una sedimentación de materiales de cuenca con pocas influencias terrígenas que, localmente debían manifestarse como corrientes de turbidez. Se trata de depósitos de fondo plano, que recubren una paleogeografía caracterizada por subsidencias diferenciales. El techo de la unidad solo se conserva en la zona central (la Carrasqueta), donde por encima de los depósitos margosos hemipelágicos, se instalan sedimentos de plataforma externa o taluds uperior atribuibles posiblemente a depósitos de tempestad. En el resto del área la regresión no debe haber quedado reflejada en los afloramientos actuales.

4.3.3 Alicante en la Cordillera Bética

La provincia de Alicante está incluida en su totalidad en la Cordillera Bética. Esta gran unidad geológica que ocupa el sur y sureste de España, coincide con una gran unidad morfológica constituida básicamente por relieves montañosos que ocupan gran parte de Andalucía, la comunidad de Murcia completa, la parte meridional de la provincia de Albacete, la totalidad de la provincia de Alicante y el sur de la de Valencia (Estevez *et al.*, 2004).

La Cordillera Bética se formó durante el plegamiento alpino y queda incluida en el conjunto de cadenas alpinas que rodean el Mediterráneo occidental (conocido como Orógeno Perimediterráneo occidental).

En función de la edad de las rocas que afloran y del grado de deformación que les afecta, en la Cordillera Bética se diferencian cuatro grandes unidades geológicas: las Zonas Externas, las Zonas Internas, el Complejo del Campo de Gibraltar y las Cuencas Neógeno-Cuaternarias (Figura 4.3.1)

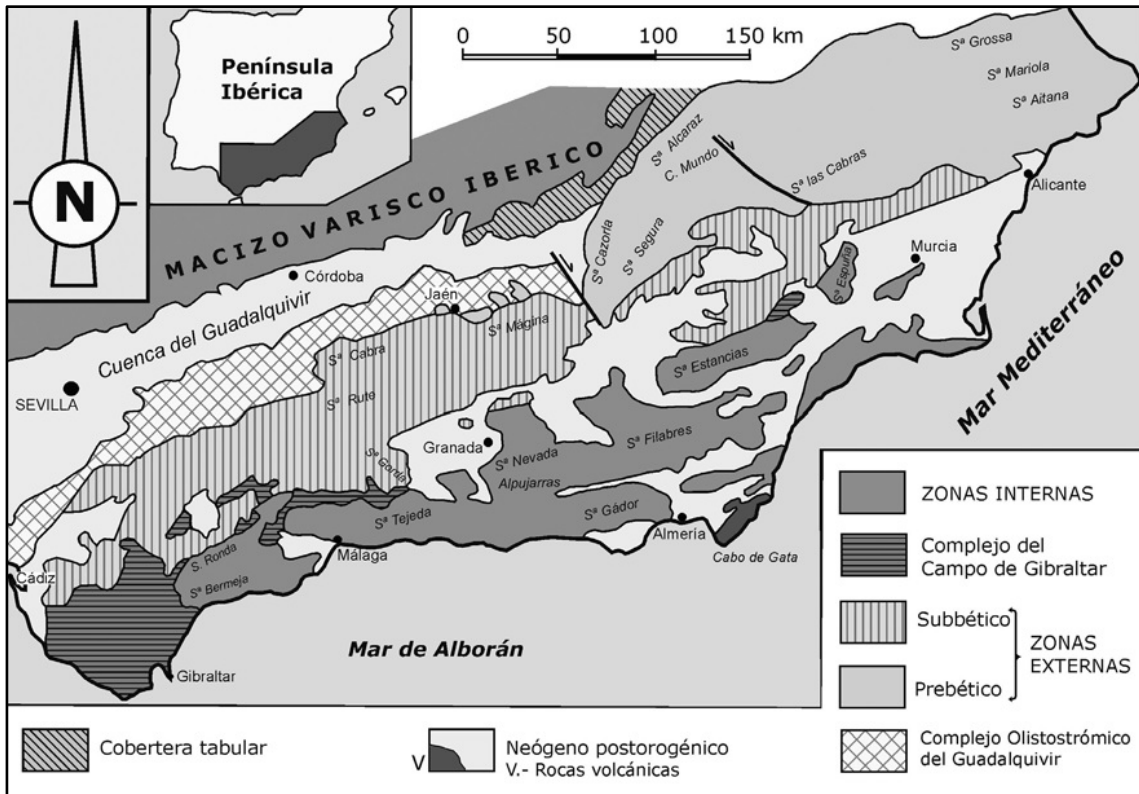


Figura 4.3.1. Mapa geológico de la Cordillera Bética. Tomado de Estévez *et al.*, 2004.

Las Zonas Internas están constituidas mayoritariamente por rocas metamórficas (Dominio de Alborán), mientras que las Zonas Externas están constituidas por rocas sedimentarias que se depositaron, en su día, al sur del Macizo Ibérico (conocido como paleomargen sudibérico). En la Cordillera Bética, las principales estructuras tectónicas (pliegues y cabalgamientos) son vergentes hacia el NNW (el desplazamiento relativo de los bloques se produce desde el interior hacia el exterior del orógeno). Las Zonas Internas, situadas en la parte meridional, muestran estructuras tectónicas más profundas, que afectan a un basamento “cristalino”, mientras que las Zonas Externas están caracterizadas por una tectónica más superficial (tectónica de cobertera).

En la provincia de Alicante, de las grandes unidades anteriormente descritas están representadas ampliamente las Zonas Externas, especialmente el Prebético que ocupa más de la mitad de la provincia de Alicante (Figura 4.3.2). Localmente aflora el Subbético, en las Sierras de Reclot, Algayat y Crevillente, que constituyen el extremo oriental de los afloramientos subbéticos. Con carácter todavía más local existen pequeños afloramientos de las Zonas Internas (pertenecientes al Complejo Alpujárride), en las proximidades de Orihuela y Callosa de Segura. El Complejo del Campo de Gibraltar no está representado en este sector oriental de la Cordillera. Finalmente, los materiales más recientes ocupan las cuencas o depresiones neógeno-cuaternarias, de las cuales la más importante es la que se extiende a caballo de las provincias de Murcia y Alicante.

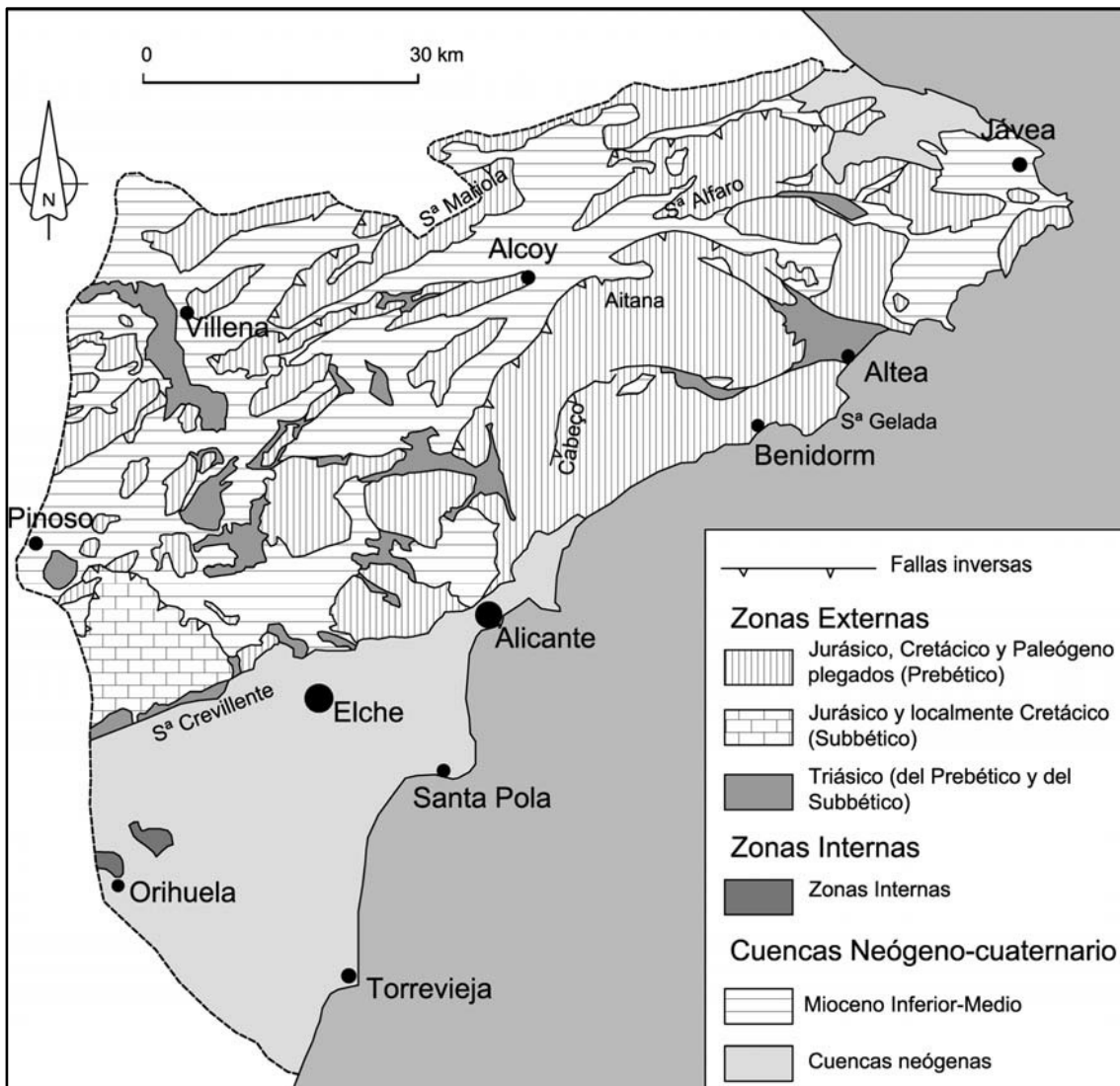


Figura 4.3.2. Mapa geológico de la provincia de Alicante. Tomada de Estévez *et al.*, 2004.

Para la buena comprensión de las características geológicas de nuestra provincia, se tratan a continuación los rasgos más destacados de cada uno de los grandes conjuntos que conforman este sector oriental.

Zonas Externas

Están constituidas por materiales depositados en su día en el borde meridional de la Placa Ibérica y se extienden al N de la línea Crevillente-Alicante, ocupando gran parte de esta provincia y el extremo sur de la de Valencia. En ellas se diferencian dos dominios: Zona Prebética y Zona Subbética.

La Zona Prebética, o más sencillamente Prebético, aflora al N del paralelo de la ciudad de Alicante ocupando casi dos tercios de la provincia. Los términos más antiguos son los del Triásico, que afloran mayoritariamente en estructuras extrusivas (diapiros) en las que los materiales arcillosos ricos en sales perforan los términos más modernos situados sobre ellos. Los diapiros más significativos son los de Pinoso (Cabeçó de la Sal, desde donde se extraen

salmueras que se utilizan en las salinas de Torre Vieja), el de Altea y los localizados a lo largo del valle del Vinalopó. Los siguientes términos, en edad, son los del Jurásico formados por rocas carbonatadas que afloran de manera muy reducida en los núcleos de antiformes o a favor de fallas con importante salto en vertical y en dirección (Cabeçó d'Or, Fontcalent, Puig Campana, etc.). Los materiales del Cretácico afloran ampliamente dando importantes relieves montañosos (Mariola, Serrella, Aixorta, Alfaro, El Cid, Gelada, etc.) entre los que dominan, en la mitad norte de la provincia, las calizas organógenas, entre ellas las calizas con rudistas y las calcarenitas de orbitolinas. Menos abundantes en los materiales cretácicos son las margas con ammonites, ya descritos hace un siglo por Jiménez de Cisneros (1904, 1916) y las dolomías. En la parte más meridional del Prebético las calizas organógenas depositadas en plataformas marinas someras no aparecen ya que cambian a margas marinas pelágicas, de mayor profundidad, y semejantes a los términos del Subbético. En Agost, situada a 11 km al noroeste de Alicante, en estas facies pelágicas se localiza una capa oscura que marca el límite Cretácico-Terciario (hace 65 Ma), un nivel de referencia mundial a favor de la hipótesis del impacto de un gran meteorito. El Paleógeno destaca por el gran desarrollo de las calizas pararecificales con Alveolinas y Nummulites que ocupan extensamente las cumbres de Sierra Aitana. En el Coto (norte de Algueña) se explotan estas calizas como piedra ornamental que recibe el nombre comercial de "crema marfil". En áreas más meridionales estas calizas no afloran y en su lugar aparecen margas ricas en foraminíferos planctónicos, con intercalaciones de turbiditas.

Desde el punto de vista estructural, en el Prebético, las estructuras dominantes corresponden a pliegues, con algunas fallas asociadas (Figura 4.3.3 y Figura 4.3.4). En el sector más meridional existen frecuentes pliegues y cabalgamientos vergentes al NNW o NW (incluso al W), jalonados por sucesiones verticales o francamente invertidas, como ocurre en El Cid-Penyes Montes, Tossal Redó-Canteras de Sant Vicent del Raspeig, Cabeçó d'Or. Muchas de estas estructuras se asocian a fallas de salto en dirección paralelas en general a las directrices de la cadena.

Otras estructuras de importancia son las fallas normales y de salto en dirección de direcciones en torno a NW-SE, que retocan más tardíamente las cuencas intramontañosas de nuestra provincia, pudiendo incluso condicionar totalmente su morfología definitiva (Foia de Castalla, Foia d'Alcoi, Valle del Vinalopó). Un buen ejemplo de estas fallas es la de Guadalest-Bernia que limita el afloramiento triásico de Altea y constituye el escarpe del Morro del Toix. Aunque menos numerosas, las hay también de dirección NE-SW como las fallas que afectan a la plataforma marina y han modelado el litoral (Cala del Moraig, Benitatxell).

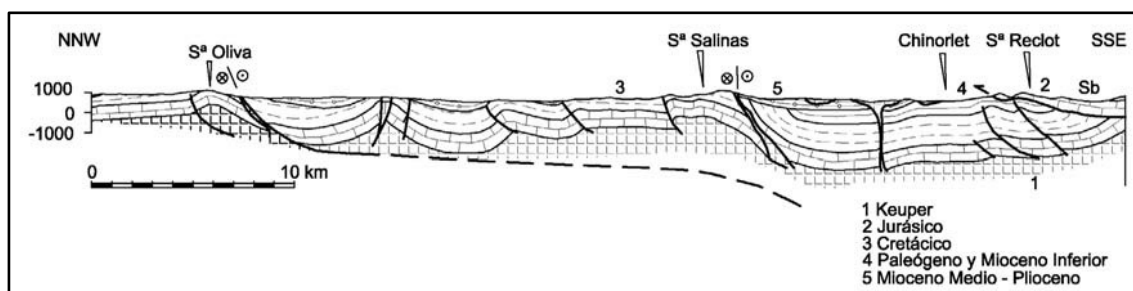


Figura 4.3.3. Corte geológico esquemático de las Zonas Externas de la Cordillera Bética en el sector de la provincia de Alicante. Tomado de Estévez *et al.*, 2004.



Figura 4.4.4. Panorámica de los relieves plegados del Prebético de Alicante (Zonas Externas) en el sector del Puig Campana y el Ponocho (cortesía del Diario Información). Tomado de Estévez *et al.*, 2004.

La Zona Subbética o Subbético aflora exclusivamente al noroeste de Elche en las sierras de Crevillent, Algayat y Reclot antes citadas, en las cuales aparecen esencialmente materiales del Mesozoico. El Subbético cabalga ampliamente, hacia el norte, sobre el Prebético (Figura 4.3.3). La Zona Subbética comprende terrenos mesozoicos y terciarios de facies marinas que, a partir del Liásico medio, se diferenciaron paleogeográficamente del Prebético, desarrollando sucesiones estratigráficas de características propias. El Triásico está representado por arcillas violáceas con abundantes yesos semejantes al Triásico del Prebético. El Jurásico está formado por dolomías en los términos más antiguos y calizas en el resto, que en diferentes niveles tienen faunas de ammonites. Todos estos materiales se depositaron en un alto fondo pelágico (calizas nodulosas y amplias lagunas estratigráficas). Algunas de estas rocas (calizas nodulosas) son explotadas en la Sierra de Reclot, al oeste de La Romana, como piedra ornamental que se conoce con el nombre comercial de “Rojo Alicante”. El Cretácico, mucho menos extenso en afloramiento, se caracteriza por una sedimentación pelágica relativamente profunda, representada por margas y calizas margosas con ammonites (Cretácico Inferior) y calizas margosas con foraminíferos planctónicos (Cretácico Superior).

El Subbético está estructurado en mantos de corrimiento de vergencia N que afectan a la cobertera mesozoico-terciaria la cual se ha desplazado a favor de los niveles plásticos del Triásico keuper. Los materiales subbéticos cabalgan ampliamente sobre el Prebético según una superficie subhorizontal. Recientes trabajos han puesto de relieve el papel jugado por grandes fallas de dirección ENE-WSW (zona de falla de Crevillente), que jalonan el contacto con la Zona Interna.

Zonas Internas

Los afloramientos de las Zonas Internas Béticas incluidos en la provincia de Alicante pertenecen en su totalidad a las unidades inferiores poco metamórficas del Complejo Alpujárride. Están constituidos mayoritariamente por materiales de edad Triásico Inferior y Medio de facies someras. Hacia la base de la sucesión aparecen filitas y cuarcitas en escasos asomos de extensión muy reducida, coronadas por una serie potente de calizas, dolomías, que originan los relieves montañosos de las sierras de Orihuela (Figura 4.3.5) y Callosa y otros pequeños resaltes dispersos, rodeados por los materiales neógeno-cuaternarios de la cuenca

Capítulo 4. Área de estudio

del Bajo Segura. El vestigio alpujárride más oriental se encuentra frente al Cabo de Santa Pola, en la isla de Tabarca. Cabe asimismo destacar que, dentro de la serie estratigráfica alpujárride, hacia la base de los carbonatos, suelen aparecer intrusiones de rocas ígneas básicas (ofitas) bien expuestas en las canteras del túnel de Orihuela y en la isla de Tabarca. La poca extensión de los afloramientos no permite observar la estructuración en grandes mantos de corrimiento propia de los materiales alpujárrides.



Figura 4.3.5. Panorámica del Alpujárride (Zonas Internas) del sector central de la Sierra de Orihuela observada desde el NE. Sobre las filitas y cuarcitas que afloran en primer plano, aparece la serie carbonatada plegada hacia el N. Ambas litologías reaparecen en la parte media y alta de la sierra a causa de un cabalgamiento que recorre toda la vertiente SE (cortesía de Iván Martín). Tomado de Estévez *et al.*, 2004.

Cuencas Neógeno-Cuaternarias

Con esta denominación se agrupa un conjunto de cuencas dispersas por toda la Cordillera Bética. Se pueden separar, por un lado, las que fueron rellenas por sedimentos marinos de edad Mioceno Inferior y Medio simultáneos a la principal etapa de colisión continental (también llamados sinorogénicos por muchos investigadores) y, por otro, las que fueron rellenas por sedimentos marinos y continentales de edad Mioceno Superior a Cuaternario (estas cuencas también reciben el nombre de postorogénicas). Hay que tener en cuenta que algunas de las cuencas “sinorogénicas” siguieron evolucionando a partir del Mioceno Superior y fueron rellenas por depósitos principalmente continentales.

En el Mioceno Inferior y Medio se producen cuencas muy estrechas y alargadas, según la “dirección bética”, que forman parte del Estrecho Nordbético que comunicaba el Atlántico y el Mediterráneo. Estas cuencas se convierten en lugar de depósito de materiales marinos de plataforma y pelágicos. Presenta un tipo de litología muy singular, conocida en levante como Tap, constituidas por margas blancas silíceas ricas en foraminíferos planctónicos y nanoplancton. Estos sedimentos (Tap) son los depósitos simultáneos a la principal etapa de colisión continental (sinorogénicos) y, por ello, en el seno de las mismas, localmente aparecen bloques de rocas de materiales más antiguos, producto de la destrucción parcial de los relieves montañosos que se estaban formando durante este tiempo por efectos del plegamiento, de la

Capítulo 4. Área de estudio

fracturación o del diapirismo. Estos bloques, a veces de grandes dimensiones, reciben el nombre de olistolitos. Ejemplos de estas cuencas se sitúan en las alineaciones de Villena-Agres, Alcoi-Tárbena, Castalla-Carrasqueta y otras más reducidas como las de Finestrat y Guadalest. Hacia el comienzo del Mioceno Superior se produce la progresiva desconexión entre el Mediterráneo y el Atlántico y el relleno acaba por hacerse continental.

En relación con las cuencas del margen mediterráneo la principal característica que permite diferenciarlas de las anteriores es, aparte de su posición francamente abierta hacia el mar, la existencia de depósitos marinos entre el Mioceno Superior y el Plioceno. Incluso, en la franja litoral aflora Pleistoceno de carácter marino. Entre ellas la más importante es la Cuenca de Murcia-Alicante que se extiende al sur de una línea recta muy marcada, visible en imágenes de satélite y en los mapas geológicos, que corresponde a una gran falla denominada en la nomenclatura geológica como Falla de Crevillente (Figura 4.3.6). En concreto el sector alicantino de esta depresión recibe el nombre de Cuenca del Bajo Segura. Su relleno sedimentario neógeno- cuaternario es de carácter postorogénico y comprende términos del Mioceno Superior, Plioceno y Cuaternario.

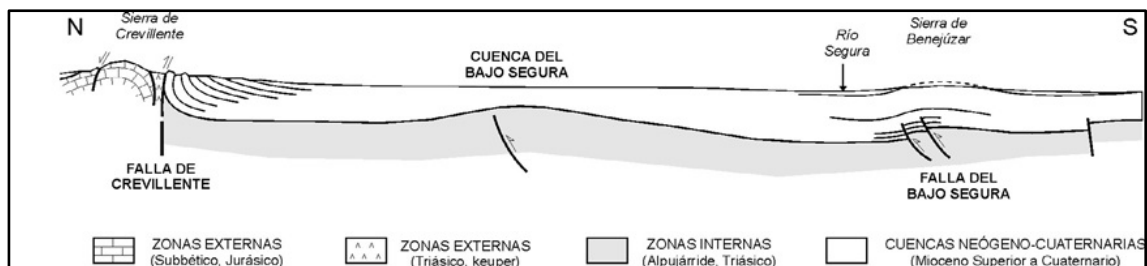


Figura 4.3.6. Corte geológico esquemático de la cuenca del Bajo Segura en el que están representadas la fallas de Crevillente al N y la falla del Bajo Segura al S.

Al N de la Falla de Crevillente aparece la Cuenca del Vinalopó, que representaría un brazo de mar hacia las cuencas interiores durante el Mioceno Superior. En ella afloran depósitos marinos de esa edad (Agost, Orito, Elda, Monòver, Villena) y depósitos continentales más recientes correspondientes a la retirada definitiva del mar hacia sectores litorales situados al S de la falla.

Finalmente, junto a la costa mediterránea, en el límite con la provincia de Valencia en la que ocupa su mayor extensión, aparece la llanura costera septentrional como apéndice meridional de la Cuenca neógena de Valencia, a caballo entre las cordilleras Bética e Ibérica. En ella los materiales que afloran son más recientes, mayoritariamente del Cuaternario.

4.3.4. Geología de los taludes seleccionados

La zona de Alcoy

Se extiende alrededor de las poblaciones de Dénia, Concentaina, Alcoi, Castalla, Saix y el Pinós. En esta zona los pliegues siguen una dirección NE-SW y tienen una gran continuidad lateral. En general son pliegues concéntricos de vergencia poco definida y asociados a cabalgamientos moderados mayoritariamente vergentes al NW. La mayor parte de anticlinales forman sierras. En los alrededores de Alcoy están los anticlinales de Mariola, Alfaro, Cantacuc y la Serrella; más al SW está el anticlinal de la sierra de las Salinas. Los sinclinales ocupan zonas deprimidas donde afloran materiales más recientes, sobre todo del Neógeno.

Entre Castalla, Elda y la Romana de Tarafa hay un conjunto de estructuras muy suaves (monoclinales y pliegues muy laxos), que afectan primordialmente a rocas del Paleógeno y del Neógeno. Cerca de Castalla, estas estructuras siguen una dirección NE-SW, pero a medida que avanzan hacia el SW, van orientándose progresivamente en dirección N-S, describiendo un arco de curvatura muy suave. Este arco es convexo hacia el NW, tiene más de 20 km de longitud y rodea el extremo SW de la zona del Cabeçó de l'Or y el Puigcampana. Estructuras arequeadas similares, más pronunciadas pero más pequeñas, son frecuentes en la zona del Cabeçó de l'Or y el Puigcampana.

La distribución del Paleógeno es bastante irregular en esta zona. En el NE de Alcoi es muy escaso, pero en el SW pasa a ser más abundante. En la zona más SW solo es abundante hacia el S y está muy mal representado hacia el N; por ejemplo, en el S del anticlinal de las Salinas hay un Paleógeno relativamente potente, que se adelgaza hacia el N y solo excepcionalmente rebasa el anticlinal. Las rocas del Mioceno reposan en discordancia tanto sobre rocas del Paleógeno como sobre rocas del Mesozoico.

El punto del talud seleccionado (Figura 4.3.7), del cual se ha extraído muestra alterada a la que se le han realizado los ensayos geotécnicos, se encuentra aproximadamente en el P.K. 1+300 del tramo de la Variante de Alcoy que forma parte de la Autovía A-7 del Mediterráneo. El punto de extracción de material se señala en la Figura 4.3.8 con un círculo de color verde.



Figura 4.3.7. Talud seleccionado de la variante de Alcoy.



Figura 4.3.8. Zona de extracción del material.

Capítulo 4. Área de estudio

El material extraído es un material rocoso cuya sedimentación tuvo lugar durante el Mioceno Superior, en un medio continental tipo lacustre con aportaciones de sistemas fluviales. Debido a que, probablemente la deposición de este material continuó también durante el Plioceno, se le denominará Mioceno Indiferenciado. Se compone básicamente de arcillas y argilitas con locales niveles de conglomerados. Sobre esta unidad se desarrolla la totalidad del trazado de la variante de Alcoy.

Se trata de un potente paquete de arcilla-argilita de color gris claro, en ocasiones marrón rojizo, con indicios de arena. Localmente aparecen intercalados niveles de conglomerados y arenas/areniscas de espesores decimétricos a métricos, que cuando tienen continuidad suficiente se han representado en la cartografía geológica. Localmente éstas arcillas reciben el nombre de Tap (Casaseca Y Moreno, 2003).

Superficialmente estos materiales se alteran por pérdida de carbonatos lo que origina argayos de poca entidad y espesor. Este hecho produce una falsa impresión de gran inestabilidad en las laderas, afectando esta inestabilidad a un espesor entre 1 y 3 m, en la mayoría de los casos, aunque localmente pueden llegar hasta 5-6 m como consecuencia de la acumulación sucesiva de material.

En la Figura 4.3.8 aparecen junto a este material, representados con el color blanco y con una trama de triángulos, suelos coluviales de ladera y fondo de barranco. Estos suelos están formados por arcillas con indicios de algo de arena y pequeños niveles de grava subangulosa, todo ello de color grisáceo característico. A veces esta litología cambia a grava subangulosa con bastante arena y algo de arcilla, aunque con pequeña extensión. También se han observado en zonas próximas a grandes relieves bloques de tamaño métrico de calizas o areniscas.

Aparecen estos suelos en las laderas y fondos de vaguada de la mayor parte de la traza con espesores entre 1 y 3 m. Localmente se han localizado espesores superiores. se trata en este caso de la acumulación sucesiva de pequeños deslizamientos que han dado lugar a un espesor de hasta 9 m de suelos.

La zona de Montaverner

Regionalmente, la cuenca del río Cányoles que corre con dirección SO-NE a largo de la línea formada por las poblaciones de Xátiva y La Font de la Figuera, marca el límite NO del dominio estructural donde se sitúa La Vall d'Albaida, cuyo relleno terciario constituirá el cimiento de nuestra carretera.

El dominio estructural aludido se corresponde con largas crestas anticlinales alternantes con depresiones sinclinales colmatadas por depósitos de relleno, estructura típica del país prebético.

En nuestro caso, casi al límite con la cuenca del río Cányoles, Sierra Grossa representaría la cresta anticlinal y la Vall d'Albaida la cuenca sinclinal rellena.

Capítulo 4. Área de estudio

La cuenca de Albaida tiene geometría de “bolsa de tabaco”, con una profundidad mínima conocida de 1350 metros y una anchura relativamente corta; el relleno está constituido por la potente serie del TAP, facies calcomargosa que afecta en mayor o menor medida a la totalidad de nuestro trazado.

Los materiales terciarios del TAP se depositaron en un medio marino que por correlaciones regionales, ha sido datado como Langhiense-Tortonense, creándose, al mismo tiempo que el relleno, una división de la antigua cuenca en dos dominios paleogeográficos, a ambos lados de Sierra Grossa

El conjunto de cuencas emerge, ya de una forma definitiva, durante el Tortonense Superior, sufriendo diferentes procesos diapíricos que crean nuevos medios individualizados con sedimentación lacustre.

Finalmente se establece la red fluvial actual que produce los depósitos continentales que cubren el substrato terciario margoso, a base de sedimentos aluviales(limos de inundación, terrazas, etc.)y aluvio-coluviales (arcillas arenosas y gravas fundamentalmente).

El punto del talud seleccionado (Figura 4.3.9), del cual se ha extraído muestra alterada a la que se le han realizado los ensayos geotécnicos, se encuentra en el P.K. 2+325 (Figura 4.3.10) del tramo de la Variante de Montaverner.



Figura 4.3.9. Aspecto del talud seleccionado.

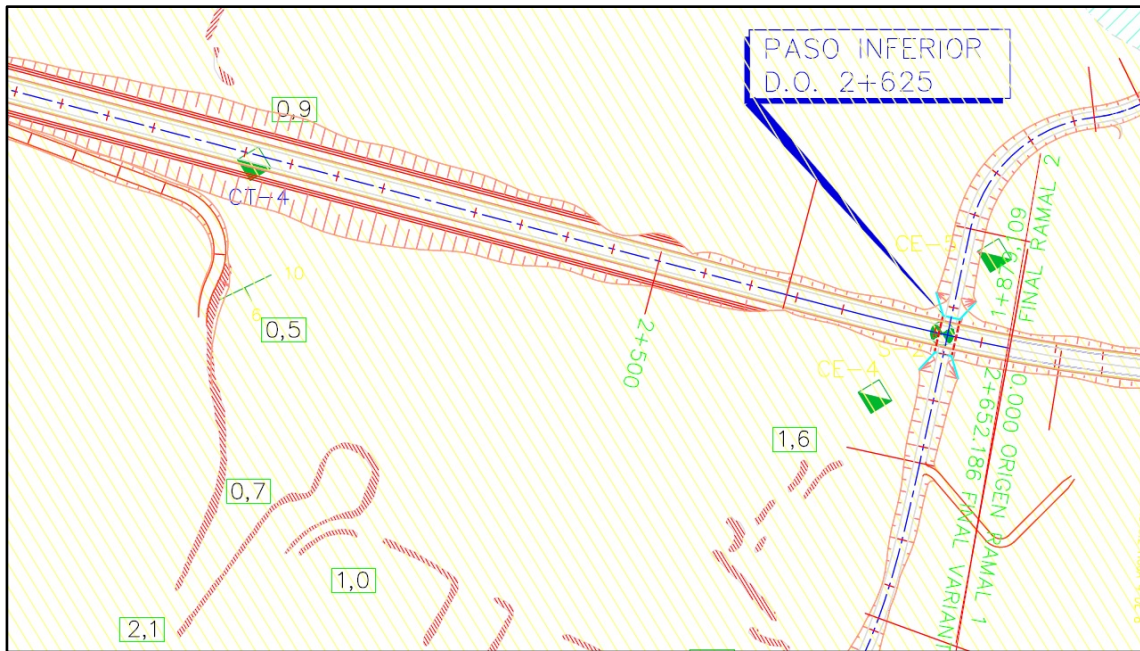


Figura 4.3.10. Plano de la zona seleccionada.

El Terciario en nuestra zona está representado por una potente serie monótona de margas que se corresponden con depósitos marinos transgresivos conocidos como “**Facies TAP**”.

Esta serie está constituida por margas calcáreas; amarillas en superficie y grisazuladas en profundidad; y suele contener fauna planctónica de Globigerinos entre otros.

A lo largo de la traza se presentan de color gris-ocre y/o blanquecinas. Se pueden observar dos unidades diferenciables dentro de esta facies que quizás correspondan a dos tramos diferentes dentro de la columna estratigráfica general. Por un lado, en la mitad Sur del trazado, aparecen con aspecto masivo y estratificación poco visible además de presentar resistencia baja (R=0-1). En la mitad Norte del trazado, las margas afloran con aspecto lajoso, estratificación muy marcada, con buzamientos subhorizontales, 10-15 hacia el Este, y resistencia algo más alta (R=1-2) que en el tramo anterior

En el área de ocupación del “Viaducto” el color es gris oscuro, de estratificación igualmente horizontal y de resistencia superior que la presentada en los dos tramos anteriores (R=2).

La zona de Benissa

El punto del talud seleccionado (Figura 4.3.11 y Figura 4.3.12), del cual se ha extraído muestra alterada a la que se le han realizado los ensayos geotécnicos, se encuentra aproximadamente en el P.K. 0+700 del tramo de la Variante de Benisa. El punto de extracción de material se señala en la Figura 4.3.13 con un círculo con la numeración 41.

Capítulo 4. Área de estudio

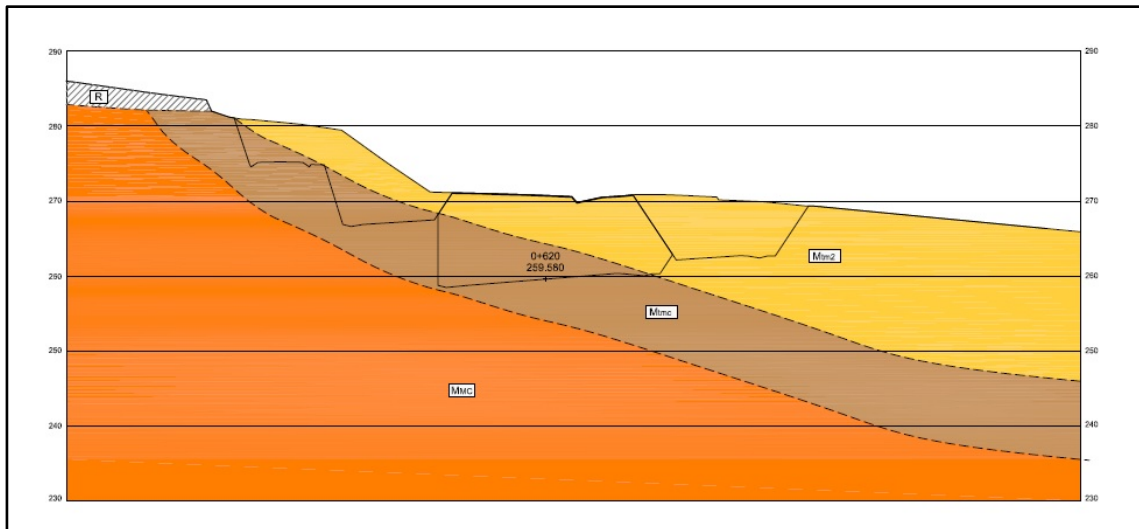


Figura 4.3.11. Talud seleccionado de la Variante de Benisa. Casaseca y Moreno, 2003



Figura 4.3.12. Aspecto del desmonte existente previa ejecución de la obra. García y Cuadrado, 2010.



Figura 4.3.13. Punto de extracción de material. García y Cuadrado, 2010.

Los materiales extraídos en superficie en dicho punto constituyen el sustrato general de la zona y son atravesados a lo largo de todo el trazado, enmarcándose esta formación dentro de las facies "Tap" (García y Cuadrado, 2010).

Predominan las margas blanquecinas meteorizadas en superficie de plasticidad media a baja y la consistencia oscila entre muy firme y dura. Por los fenómenos de expansividad el diaclasado es intenso en las zonas con mayor grado de calcificación.

Con grado III de meteorización se intercalan niveles de areniscas de grano fino, con cemento calcáreo, bien graduadas y grado 3 de resistencia. Junto con afloramientos compuestos por una alternancia de margas y limonitas, estas últimas diaclasadas y con alguna junta rellena por calcita, de grado 2-3 de resistencia. Además se han distinguido margocalizas de grado 2 de resistencia en alguno de los afloramientos descritos.

En la zona inicial del trazado se observa una alternancia de margas y areniscas. Las proporciones de marga y arenisca/limonita resultan variables, desde 50%-50% a valores de 80%-20% en techo.

Por otro lado, en la zona final del trazado se observa una alternancia de margas blanquecinas duras y limonitas de grado 3 de resistencia y grado III de meteorización, con una proporción aproximada de 55%-45%.

Las observaciones de campo realizadas ponen de manifiesto la alteración de las margas, que presentan una intensa red de diaclasado y una hojosisidad ocasionalmente bastante marcada. Esto podría dar lugar en desmontes a su desagregación en lajas y la de la erosión de estos materiales en superficie.

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

5.1. PLAN DE TRABAJO

La motivación del presente trabajo tiene como origen la observación de problemas de estabilidad en taludes construidos en un material mioceno margoso, denominado como Tap, que se localiza principalmente en el sur de la provincia de Valencia y en el norte de la provincia de Alicante, formando las cuencas neógeno-cuaternarias que se asientan sobre el dominio Prebético Externo de la Cordillera Bética.

El objetivo del mismo es la caracterización geológica y geotécnica de las facies Tap, así como el establecimiento de relaciones entre los parámetros geotécnicos que las definen y la propuesta de soluciones con el fin de mejorar el comportamiento de los taludes construidos en este material.

Área de Estudio

El área de estudio comprende el sur de la provincia de Valencia y la mitad septentrional de la provincia de Alicante. En esta área se encuentran las facies Tap, un material mioceno margoso correspondiente al dominio de las cuencas Neógeno – Cuaternaria. Estos depósitos se emplazan sobre el dominio Prebético Externo de la Cordillera Bética. Los taludes seleccionados para su caracterización pertenecen a los siguientes proyectos constructivos:

- 1) Autovía A-7 del Mediterráneo. Tramo: Variante de Alcoy.
- 2) Variante de Montaberner. N-340.

Climatología

El área de estudio tiene un régimen pluviométrico Mediterráneo, caracterizado por la aridez e irregularidad interanual, factores que definen el fenómeno pluviométrico en esta zona como de indigencia pluviométrica (M.Box, 1982) con un ratio muy bajo de nº de días con precipitación/año. Las escasas precipitaciones que se dan en esta área vienen casi en su totalidad aportadas por la existencia de procesos de gota fría o baja desprendida en altura.

La presencia de aire anormalmente frío en altura que tiene como consecuencia un alto gradiente térmico en la vertical y la inercia térmica de las aguas marinas que da lugar a la existencia de aire cálido y húmedo muy inestable, provocan que las poco frecuentes lluvias que se producen en la zona sean aguaceros de excepcional intensidad horaria.

La temperatura media anual en el área de estudio es de 18 °C, dándose las máximas absolutas en los meses de julio y agosto y las mínimas absolutas en los meses de enero y febrero. Por tanto, nos encontramos en una zona con un régimen térmico plenamente mediterráneo caracterizado por un verano relativamente caluroso y por la suavidad del invierno.

Actividad y economía

La economía de la zona de estudio está claramente dominada por los cultivos de interior y la industria, con una larga tradición en las industrias del textil y el papel.

Infraestructuras

Por el área de estudio transcurren numerosas carreteras y líneas de ferrocarril y existen numerosos proyectos constructivos de los cuales se puede obtener una valiosa información, sobre todo en lo que respecta a la caracterización geotécnica de las facies Tap. Algunos ejemplos de estos proyectos son los siguientes:

- Autovía A-33 Cieza – Font de la Figuera. Tramo A-31 – A-35 (Font de la Figuera).
- Proyecto de Construcción Autovía del Mediterráneo. Tramo: Concentaina – Muro de Alcoy. Provincia de Alicante.
- Autovía A-7 del Mediterráneo. Tramo: Variante de Alcoy.
- Variante de Montaberner. N-340.
- Proyecto de Terminación Variante de la Carretera N-332 del P.K. 175 + 190 al 179 + 650. Tramo: Variante de Benissa (Alicante).
- Proyecto de Construcción: Autovía del Mediterráneo. Tramo: Muro de Alcoy – Puerto de Albaida.

Caracterización en el campo

La caracterización en el campo se basa principalmente en la descripción de los taludes de los cuales se extrae mediante pala, el material con el que se van a realizar los ensayos en el laboratorio. La descripción de los taludes comprende los siguientes aspectos:

- Situación geográfica.
- Orientación (dirección y buzamiento).
- Dimensiones.
- Litología.
- Estratigrafía.
- Caracterización geomecánica del macizo rocoso.
- Observación de inestabilidades en el talud, así como de obras accesorias de drenaje.

Caracterización en el laboratorio

El ensayo principal que se va a realizar con el material extraído es el Slake Durability Test. Este ensayo fue diseñado por Franklin y Chandra (1972) y tiene como objeto predecir la alterabilidad del suelo con los ciclos de humedad – sequedad. El resultado convencionalmente más importante de este ensayo es el Índice Sehudes (Id_2) que se define como el porcentaje de material retenido en un tambor fabricado con una malla metálica de abertura 2 mm tras dos ciclos del ensayo sobre

Capítulo 5. Metodología

la muestra total. En este estudio se van a realizar 6 ciclos de cada muestra, con las siguientes variantes, en el caso de las muestras DIT14-201 y DIT14-601 procedentes de Alcoy y Montaberner, respectivamente:

- 1) Muestra seca con agua destilada.
- 2) Muestra seca con agua procedente de la zona de extracción del material.
- 3) Muestra con humedad higroscópica con agua destilada.
- 4) Muestra con humedad higroscópica con agua procedente de la zona de extracción del material.

Con las muestras DIT14-1001 procedentes de Benissa, debido a la heterogeneidad del material Tap encontrado allí, se han considerado unas variables distintas:

- 1) Ensayo con muestra seca y agua destilada en calizas margosas.
- 2) Ensayo con muestra seca y agua de la zona en calizas margosas.
- 3) Ensayo con muestra seca y agua destilada en margas calcáreas.
- 4) Ensayo con muestra seca y agua de la zona en margas calcáreas.

Además, con el fin de obtener relaciones empíricas entre el Índice Sehúdes y otros parámetros geotécnicos se realizan los siguientes ensayos:

- Humedad natural, humedad higroscópica.
- Granulometría por sedimentación y granulometría del material depositado en la cubeta tras 6 ciclos del *Slake Durability Test*.
- Límites de Atterberg (Límite líquido y límite plástico de la muestra) y el límite de retracción.
- Contenido en materia orgánica, sulfatos solubles y carbonatos.
- Densidad aparente
- Peso específico de las partículas del suelo.
- Conductividad.
- Ensayo Proctor para la determinación de la humedad óptima y la densidad seca máxima.
- Ensayo de consolidación, hinchamiento libre y presión de hinchamiento.
- Ensayo de resistencia a compresión simple.
- Ensayo de corte directo.
- Ensayo Pin-hole de dispersividad.

5.2. METODOLOGÍA UTILIZADA

5.2.1. Material de campo

Para la caracterización de taludes y afloramientos rocosos, así como la toma de muestras, el equipo de campo utilizado ha sido el habitual en geología e ingeniería geológica:

- Martillo de geólogo (Figura 5.2.1).



Figura 5.2.1. Martillo de geólogo.

- chaleco reflectante (Figura 5.2.2).
- cinta de metro (Figura 5.2.3).
- brújula (Figura 5.2.4).
- pala y bolsas (Figura 5.2.5).
- garrafa de agua (Figura 5.2.6).



Figura 5.2.2. Chaleco reflectante.



Figura 5.2.3. Cinta de metro.

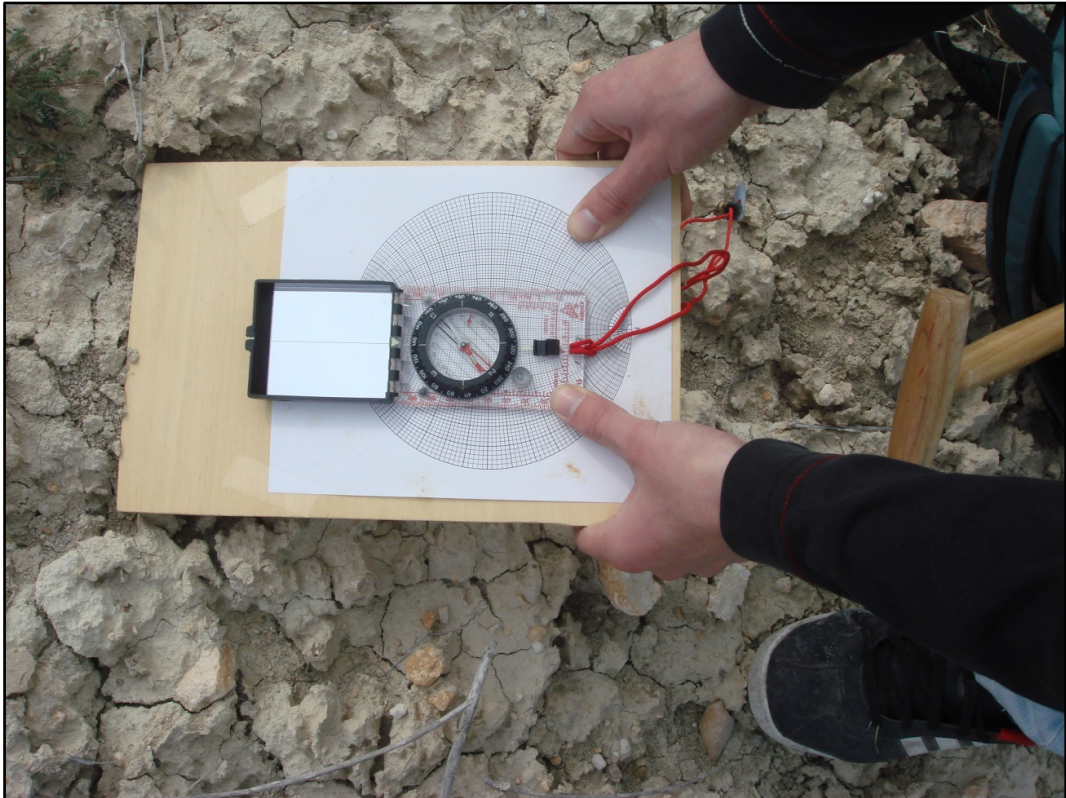


Figura 5.2.4. Brújula.



Figura 5.2.5. Pala y bolsas de plástico.



Figura 5.2.6. Garrafa de agua.

5.2.2 Caracterización de campo y muestreo

5.2.2.1 Selección del Talud

Introducción

En este apartado vamos a comentar como se llevo a cabo el trabajo de campo y el muestreo para cada una de las zonas seleccionadas

DIT14-201: Talud de la Variante de Alcoy

El primer paso en el proceso de selección del talud es la delimitación de las zonas en las que afloran las facies Tap. Para ello utilizamos las hojas geológicas escala 1:50.000 que se pueden obtener de la página web del IGME (Instituto Geológico y Minero de España). En estas hojas encontramos la distribución de los afloramientos, así como una leyenda con una breve descripción de cada litología. El talud seleccionado se encuentra al este del municipio de Alcoy y discurre sobre el material que en la Figura 5.2.7 aparece representado con color amarillo oscuro y con la nomenclatura , haciendo referencia a un mioceno indiferenciado.

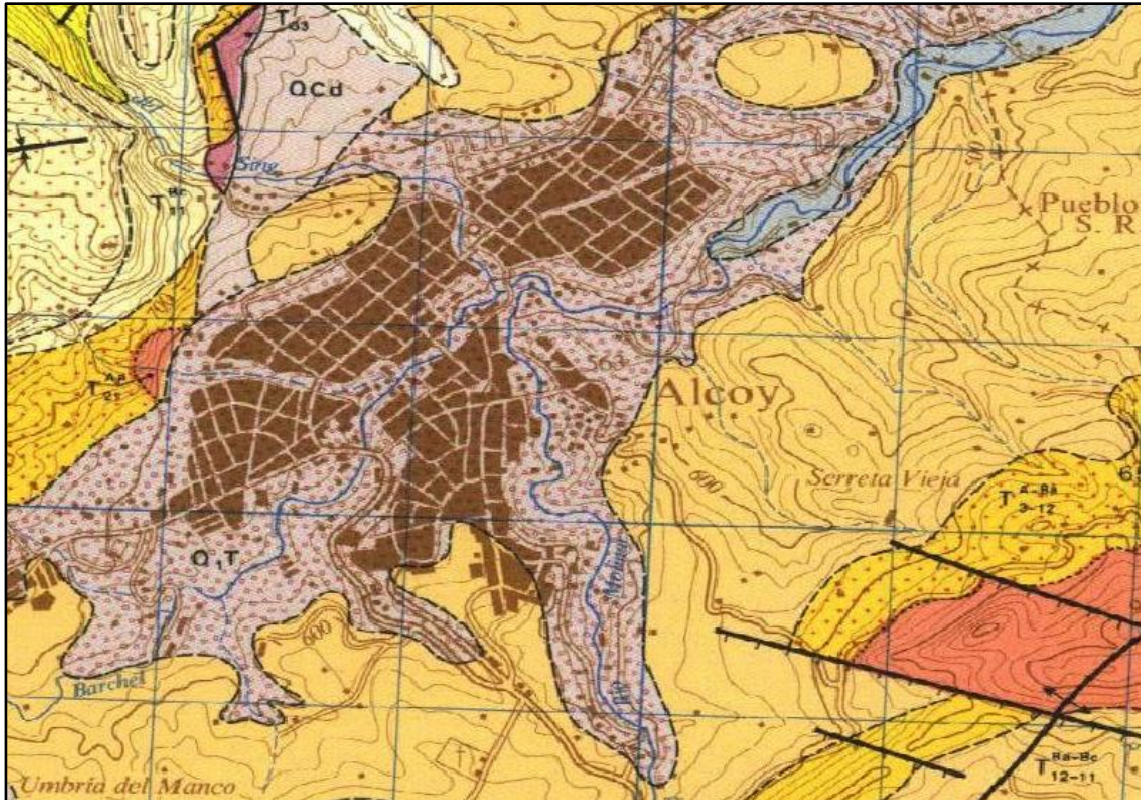


Figura 5.2.7. Hoja Magna 821. Alcoy.

Una vez delimitada toda el área donde afloran las facies Tap, el siguiente paso es el de búsqueda de proyectos constructivos de carreteras o vías férreas que discurren sobre dichos afloramientos. Para el caso de este talud se ha utilizado la información contenida en el Proyecto de Construcción “Autovía A-7 del Mediterráneo. Tramo: Variante de Alcoy”. La Figura 5.2.8, extraída de la portada de dicho proyecto, muestra a gran escala el trazado de esta variante. En este tramo encontramos varios taludes que cumplen el requisito imprescindible de estar contruidos en el material margoso mioceno, objeto de este estudio. También se consideró el hecho de que en el Anejo Geotécnico del proyecto se hubiera realizado un sondeo o una calicata en las proximidades del mismo.

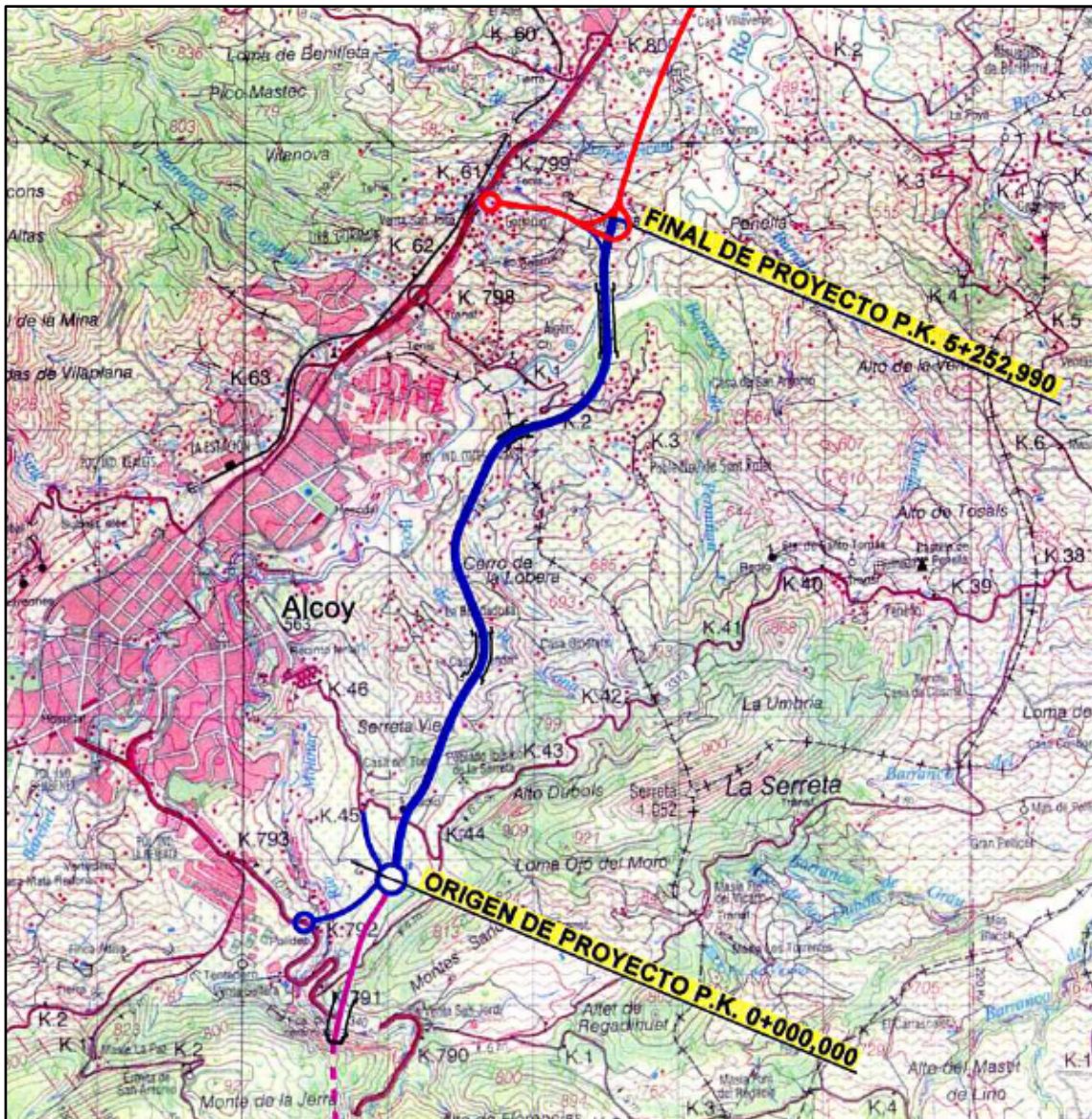


Figura 5.2.8. Portada del Proyecto de Construcción "Autovía A-7 del Mediterráneo. Tramo: Variante de Alcoy".

La selección del talud no ha dependido exclusivamente de criterios geológicos, sino que se han tenido en cuenta diversos condicionantes externos. El condicionante más importante ha sido la seguridad en la obtención de las muestras. Los taludes estudiados se encuentran en carreteras y vías principales, de alta velocidad y de uso frecuente, tanto por turismos como por vehículos pesados como camiones articulados de gran tonelaje, autocares... por lo que es muy importante la existencia de una zona o punto de estacionamiento cercano al talud, de forma que no se interfiera con la circulación de vehículos en dichas carreteras (Figura 5.2.9).

Finalmente se optó por el talud situado en el margen derecho del tramo, en el P.K. 1+300 (Figura 5.2.10) cercano al Paso Superior 1+3 (Masía de la Salud) ubicado en el PK 1+310.



Figura 5.2.9. Punto de estacionamiento del vehículo cercano al talud seleccionado.



Figura 5.2.10. Aspecto del talud seleccionado para la extracción de material. DIT14-201.

En el proyecto encontramos información obtenida mediante dos campañas geotécnicas. Una de ellas es la realizada para la redacción del proyecto en 2003 y la otra es una realizada por Getinsa en 1994. En la campaña realizada en 2003 se realizó el sondeo SPS-1+3/1 situado

aproximadamente en el mismo PK del talud seleccionado, pero en el otro margen del tramo (Figura 5.2.11). En la campaña realizada por Getinsa encontramos el sondeo S-34 en la parte superior del talud (Figura 5.2.12).

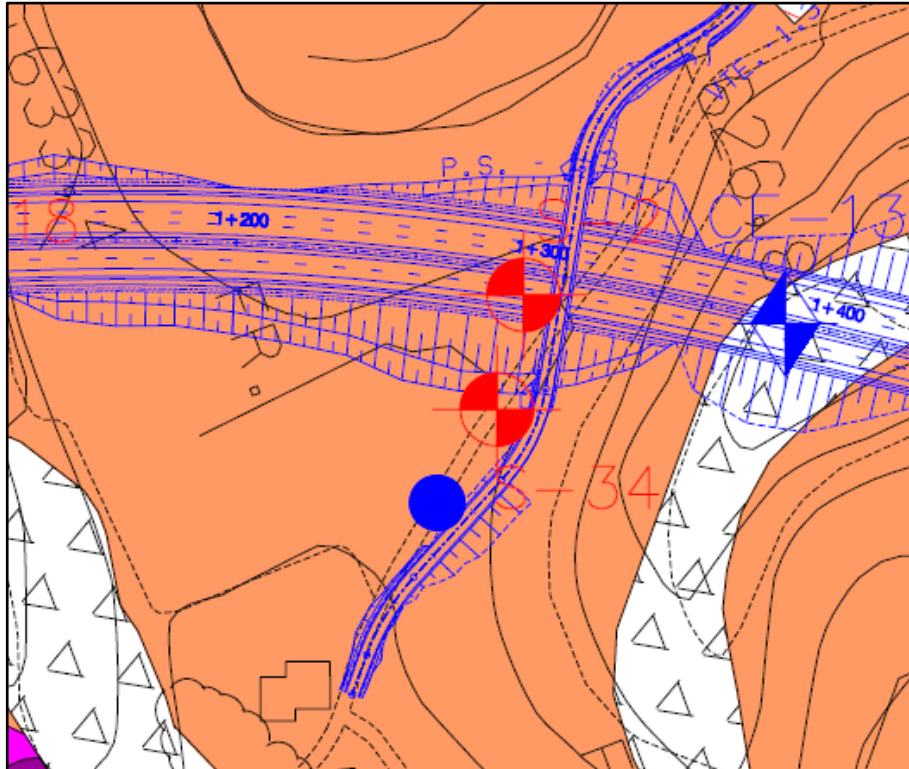


Figura 5.2.11. Sondeo S-34 realizado por Getinsa (1994) en la parte superior del talud de estudio.

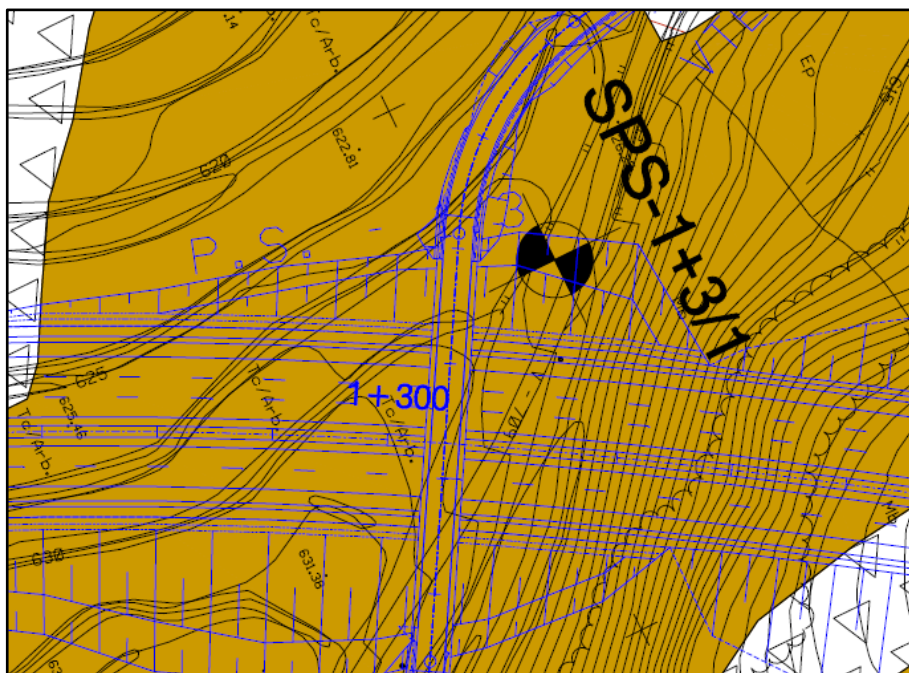


Figura 5.2.12. Sondeo SPS-1+3/1 realizado en la campaña geotécnica del proyecto.

En las inmediaciones del talud seleccionado se encuentra la Fuente de la Salud, de la que se recolectará agua para la realización del ensayo *Slake Durability Test*.

DIT14-201: Talud de la Variante de Alcoy

El talud seleccionado se encuentra al este del municipio de Montaberner y discurre sobre el material que en la Figura 5.2.13 aparece representado con color amarillo y con la nomenclatura *Tm1-11B -Bc*, haciendo referencia a margas pertenecientes a las facies Tap.

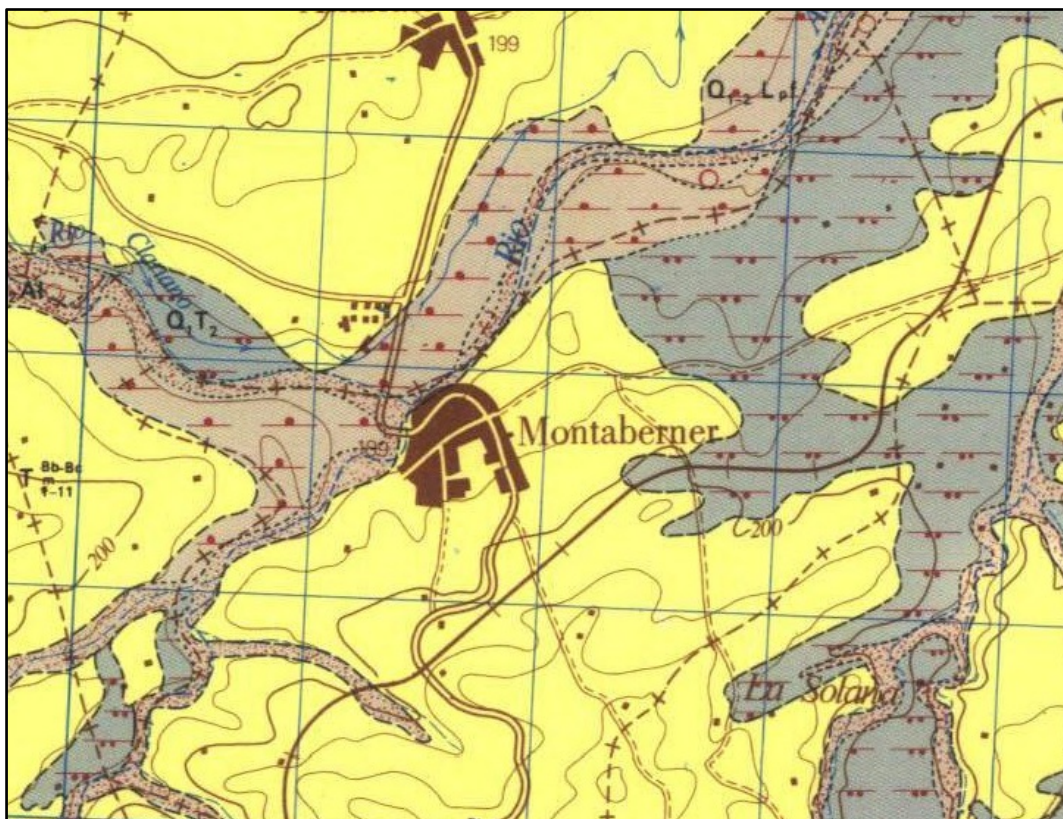


Figura 5.2.13. Hoja Magna 795. Játiva. Tomado de la página del IGME, Instituto Geológico y Minero de España.

Para la selección de este talud se ha utilizado la información contenida en el Proyecto de Construcción “Variante de Montaberner (N-340)”, donde existen varios taludes que cumplen el requisito imprescindible de estar contruidos en el material margosos mioceno del Tap. También se consideró el hecho de que en el Anejo Geotécnico del proyecto se hubiera realizado un sondeo o una calicata en las proximidades del mismo.

Finalmente se optó por el talud situado en el margen derecho del tramo, en el P.K. 2+325 (Figura 5.2.14) cercano a un paso inferior ubicado en el P.K. 2 + 625.



Figura 5.2.14. Talud seleccionado de la Variante de Montaberner.

En la campaña realizada para la redacción de dicho proyecto se realizó la calicata CT-4 situada aproximadamente en el mismo PK del talud seleccionado (Figura 5.2.15).

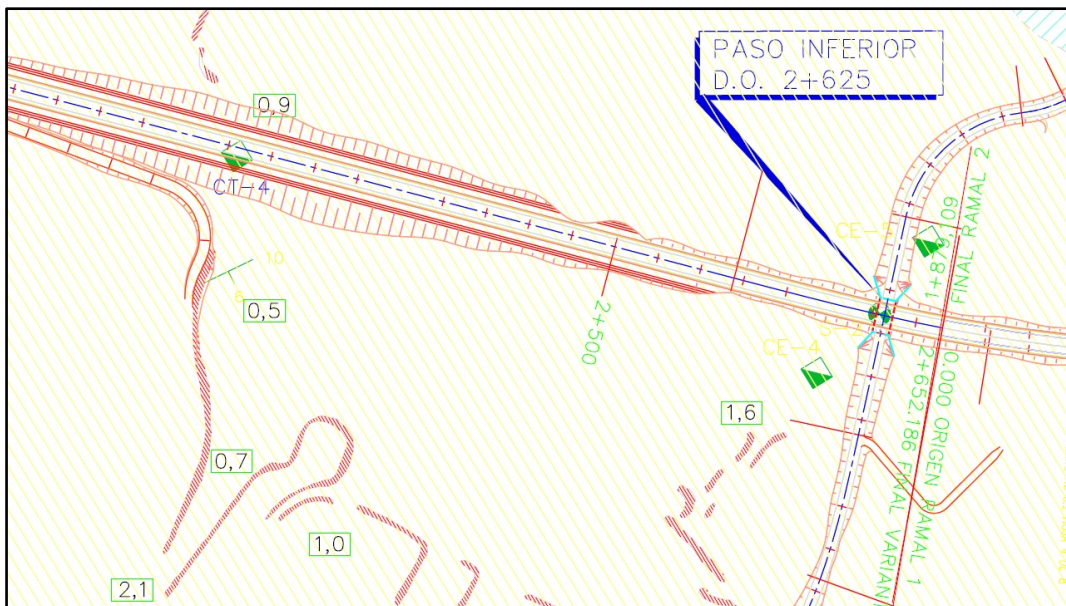


Figura 5.2.15. CT-4. Calicata efectuada para la redacción del proyecto de la Variante de Montaberner.

DIT14-1001: Talud de Benisa

El talud seleccionado se encuentra al oeste del municipio de Benisa y discurre sobre el material que en la Figura x aparece representado con color amarillo y con la numeración 19, haciendo referencia a margas blancas y niveles turbídicos “Facies Tap”.



Figura 5.2.16. Zona de extracción de material. Imagen extraída de Google Maps.



Figura 5.2.17. Rotonda diseñada para el trazado de la Variante de Benisa y trabajos geotécnicos realizados para la redacción del proyecto.

Para la selección de la zona de extracción de material Tap se ha utilizado la información contenida en el Proyecto de Construcción “Variante de Benissa de la Carretera N-332 del P.K. 175.190 al 175.650. Tramo: Variante de Benissa”, cuya construcción no se ha realizado, sin embargo en el Anejo Geotécnico de dicho proyecto, se prevé en la zona que aparece en la Figura 5.2.16 la construcción de una rotonda en la cual se han realizado numerosos trabajos geotécnicos (sondeos y calicatas) para la redacción del proyecto constructivo, tal como se observa en la Figura 5.2.17.

Finalmente se optó por una zona situada aproximadamente en el P.K. 0+700 de dicha variante.

5.2.2.2. Procedimiento de muestreo

DIT14-201: Alcoy

En la visita de campo se tomaron las siguientes mediciones del talud:

- Longitud inferior del talud (Figura 5.2.18).
- Longitud superior del talud (Figura 5.2.19).
- Pie del talud (Figura 5.2.20).
- Dirección y buzamiento del talud.



Figura 5.2.18. Medición de la longitud inferior del talud DIT14-201.



Figura5.2.19. Medición de la longitud superior del talud. DIT14-201.



Figura 5.2.20. Medición del pie del talud. DIT14-201.

Capítulo 5. Metodología

Además se registraron todos los hitos, elementos accesorios y característicos que se hallan en el talud y en la zona colindante:

- Paso superior Masía de la Salud (Figura 5.2.21).



Figura 5.2.21. Paso superior adyacente al talud. DIT14-201.

- Cubierta vegetal sobre el talud (Figura 5.2.22) y árboles (Figura 5.2.23).
- Obras accesorias de drenaje (Figura 5.2.24), así como arquetas (Figura 5.2.25), hidrantes (Figura 5.2.26) y canaleta de desagüe (Figura 5.2.27, Figura 5.2.28 y Figura 5.2.29).



Figura 5.2.22. Cubierta vegetal sobre el talud. DIT14-201.



Figura 5.2.23. Vegetación y árbol sobre el talud. DIT14-201.



Figura 5.2.24. Obras accesorias de drenaje sobre el talud. DIT14-201.



Figura 5.2.25. Arqueta al pie del talud. DIT14-201.



Figura 5.2.26. Hidrante. DIT14-201.



Figura 5.2.27. Parte inferior de la canaleta de desagüe. DIT14-201.



Figura 5.2.28. Canaleta de desagüe. DIT14-201.



Figura 5.2.29. Medición de la longitud de la canaleta de desagüe. DIT14-201.

Capítulo 5. Metodología

Se extrajeron aproximadamente 25 kilogramos de material a media altura del talud. Como se observa en la Figura 5.2.30, el material más superficial está claramente alterado y tiene un color más claro. Por tanto, es necesario, primero retirar la cubierta vegetal de la zona de excavación y posteriormente retirar unos 30 cm del material más alterado.



Figura 5.2.30. Material extraído. DIT14-201.

La instrumentación para la excavación consistió simplemente en una pala y un martillo de geólogo. Es altamente recomendable durante la excavación, obtener fragmentos más o menos grandes, dado que para el *Slake Durability Test* es necesario obtener al menos 10 fragmentos de entre 40 y 60 gramos por cada una de las variantes del ensayo, en total 40 de estos fragmentos.

Además se extrajo material de un talud situado en una carretera secundaria próxima al talud (Figura 5.2.31). Se observa en ella que el material está estratificado (Figura 5.2.32) y que se producen pequeños desprendimientos debido a la meteorización del material (Figura 5.2.33).



Figura 5.2.31. Carretera secundaria próxima al talud seleccionado. DIT14-201.



Figura 5.2.32. Margas blanquecinas del Tap donde se observa ligeramente la estratificación.



Figura 5.2.33. Ligeros desprendimientos del talud debidos a la meterorización del material margoso.

Por último se realizó una vista a la Fuente de la Salud (Figura 5.2.34), próxima al talud seleccionado, de donde se recogió agua para realizar dos de las variantes del *Slake Durability Test*.



Figura 5.2.34. Fuente de la Salud. Municipio de Alcoy.

DIT14-601: Montaberner

En este caso, no fue posible realizar las mediciones del talud debido a la presencia de una valla que lo hacía inaccesible (Figura 5.2.35), de modo que se extrajo material en una zona próxima a una pequeña carretera (Figura 5.2.36) que discurre por encima del talud (Figura 5.2.37).



Figura 5.2.35. Valla en las proximidades del talud seleccionado. DIT14-601.

Se registraron los hitos y elementos presentes en la zona (Figura 5.2.38 y Figura 5.2.39); y se extrajeron aproximadamente 25 kilogramos de material (Figura 5.2.1.40) en las proximidades del talud. Como se observa en la Figura x en material está bastante estratificado y bastante meteorizado, produciéndose pequeños desprendimientos (Figura 5.2.1.41).



Figura 5.2.1.36. Carretera secundaria próxima al talud seleccionado.



Figura 5.2.37. Talud existente bastante meteorizado del que se extrajo material. DIT14-601.



Figura 5.2.38. Hitos presentes en las proximidades del talud seleccionado. DIT14-601.



Figura 5.2.39. Obras de drenaje y desagüe en el talud. DIT14-601.



Figura 5.2.40. Material extraído.



Figura 5.2.41. Material margoso estratificado.

Capítulo 5. Metodología

En las inmediaciones del término municipal de Montaberner se encuentra una fuente de agua no potable, de la que se recolectó agua para la realización de dos de las variantes del ensayo Slake Durability Test (Figura 5.2.42).



Figura 5.2.42. Fuente de agua no potable en las inmediaciones del término municipal de Montaberner.

DIT14-1001: Talud de Benisa

A diferencia de los otros dos proyectos, la construcción de la Variante de Benissa no había sido ejecutada en la fecha en la que se recogió la muestra, de modo que se extrajo muestra de un talud existente próximo al punto seleccionado (Figura 5.2.43). Se observa la formación de regueros debida a la escorrentía del agua, lo cual puede dar una idea de la susceptibilidad del material ante la presencia de agua y de los problemas de erosión diferencial que se pueden generar debido a la heterogeneidad del material.

Se observó la presencia de grandes bloques (Figura 5.2.44) y se tomaron fotografías de los hitos (Figura 5.2.45) presentes en las proximidades y de la vegetación existente (Figura 5.2.46).



Figura 5.2.43. Talud existente del que se extrajo muestra. DIT14-1001.



Figura 5.2.44. Gran bloque encontrado sobre el talud.



Figura 5.2.45. Torre eléctrica.



Figura 5.2.46. Vegetación existente.

Capítulo 5. Metodología

Se extrajeron aproximadamente 25 kg de material margoso de la zona, bastante heterogéneo debido a la presencia de margas con un alto porcentaje de carbonatos que pueden considerarse calizas margosas (Figura 5.2.47).



Figura 5.2.47. Recogida de material del talud existente.

En las inmediaciones del término municipal de Benissa se encuentra una fuente de agua no potable, de la que se recolectó agua para la realización de dos de las variantes del ensayo Slake Durability Test (Figura 5.2.48).



Figura 5.2.48. Recogida de agua de la zona. DIT14-1001.

5.3.2 Caracterización geotécnica de las muestras

5.3.2.1 Introducción

Se ha caracterizado la durabilidad de las muestras obtenidas mediante el ensayo *Slake Durability Test* (SDT) o Ensayo de Durabilidad al Desmoronamiento. Este ensayo fue diseñado por Franklin y Chandra (1972) y actualmente es el ensayo estándar de la *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) para medir la durabilidad al desmoronamiento de las rocas de grano fino. El procedimiento de ensayo se describe detalladamente en la norma ASTM D4644 (1990), y en la ISRM (1979). En el estado español la norma de referencia es la NLT-251/91.

De cada muestra se han realizado cuatro ensayos SDT distintos. En las muestras procedentes de la Variante de Alcoy (DIT14-201) y Montaberner (DIT14-601) se han considerado las siguientes variantes:

- Ensayo con muestra a humedad higroscópica y agua destilada.
- Ensayo con muestra a humedad higroscópica y agua de la zona.
- Ensayo con muestra seca y agua destilada.
- Ensayo con muestra seca y agua de la zona.

En las muestras procedentes de la Variante de Benisa (DIT14-1001), debido a la heterogeneidad del material allí encontrado (por una parte un material más margoso, de textura y aspecto similar a los extraídos en el resto de zonas, al que nos referiremos como marga calcárea y por otra un material más calcáreo muy blanquecino y de menor densidad, al que nos referiremos como caliza margosa), las cuatro variantes consideradas son las siguientes:

Capítulo 5. Metodología

- Ensayo con muestra seca y agua destilada en calizas margosas.
- Ensayo con muestra seca y agua de la zona en calizas margosas.
- Ensayo con muestra seca y agua destilada en margas calcáreas.
- Ensayo con muestra seca y agua de la zona en margas calcáreas.

Además del ensayo SDT, se han realizado otros ensayos geotécnicos a las muestras (límites de Atterberg, ensayos de consolidación, de resistencia...) con el fin de obtener relaciones entre el Índice Sehudes (I_d) que se obtiene del ensayo SDT y otros parámetros geotécnicos.

5.3.2.2 Ensayos de granulometría por tamizado

Introducción

Este ensayo tiene por objeto determinar los diferentes tamaños de las partículas del material que queda depositado en la cubeta del aparato utilizado para el ensayo Slake Durability Test, tras la realización de 6 ciclos de dicho ensayo.

La normativa consultada para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.101:1995 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

Preparación de la muestra

Para la realización de este ensayo partimos del material depositado en la cubeta tras la finalización del ensayo Slake Durability Test (Figura 5.2.49). Dado que la abertura de los orificios de la malla del tambor utilizado en dicho ensayo es de 2 mm, todas las partículas depositadas en la cubeta tendrán un tamaño inferior a dicho diámetro.

Es necesario un tratamiento previo de lavado de finos. El lavado de finos consiste en hacer pasar el material por el tamiz de lavado (diámetro de 0.08 mm), desmenuzando las aglomeraciones de partículas y haciendo pasar un chorro de agua del grifo por él. Las partículas de diámetro inferior a 0.08 mm pasaran por el tamiz, de modo que el agua que atraviesa tendrá una coloración terrosa. El tratamiento previo de lavado de finos se dará por finalizado, cuando esta agua deje de tener coloración. El material que ha quedado retenido por el tamiz de lavado se coloca en una bandeja y se lleva a estufa a 110 °C, hasta que pierda toda su humedad.

Realización del ensayo

Una vez la muestra ha perdido toda su humedad, se extrae la bandeja de la estufa. Se montan uno encima de otro los siguientes tamices en el siguiente orden (de arriba abajo):

- Tamiz ASTM N° 10: 2mm
- Tamiz ASTM N° 16: 1.25 mm
- Tamiz ASTM N° 40: 0.40 mm
- Tamiz ASTM N° 80: 0.16 mm

- Tamiz ASTM N° 200: 0.08 mm
- Cazo metálico

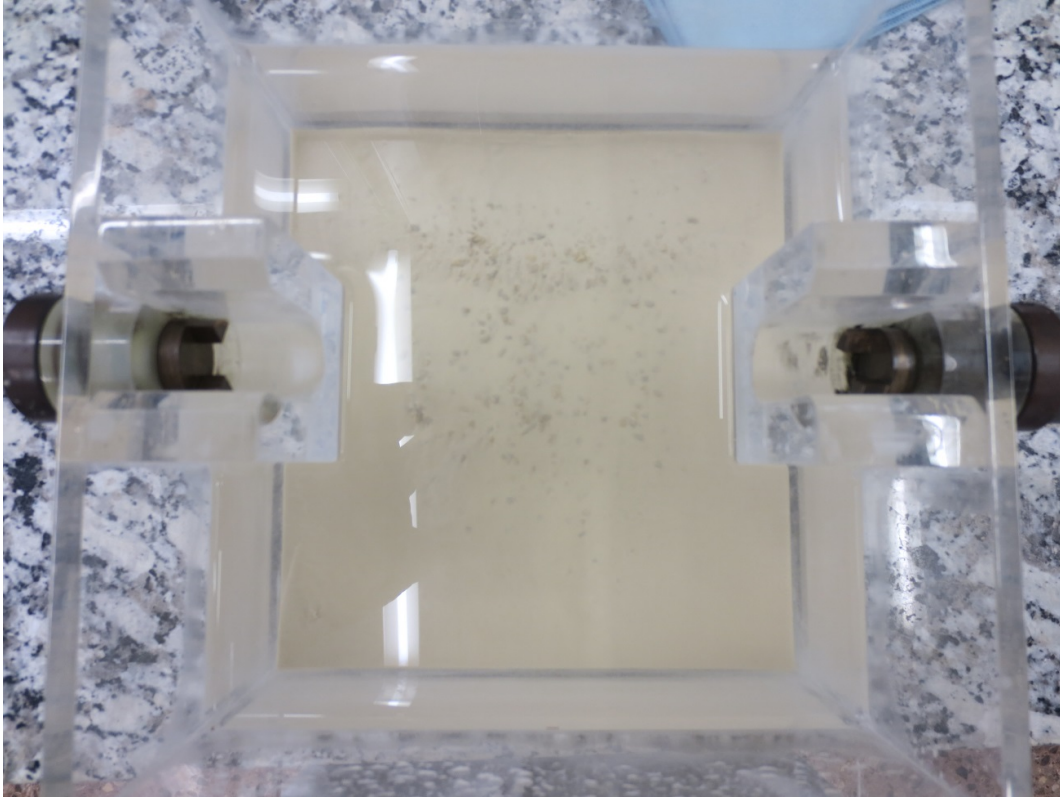


Figura 5.2.49. Material depositado en la cubeta tras 6 ciclos del SDT.

Con la ayuda de un pincel se vuelca el material seco contenido en la bandeja sobre la parte superior de esta torre de tamices y se coloca la torre con una tapa en su parte superior en una tamizadora mecánica (Figura 5.2.50).

Se pone en marcha la tamizadora mecánica por un tiempo aproximado de 2 minutos, suficiente para que todas las partículas inferiores a la abertura de un determinado tamiz pasen a través de él.

El siguiente paso consiste en pesar el material que ha quedado retenido en cada uno de los tamices, anteriormente mencionados. Es de suponer que en el tamiz de 2 mm no habrá ninguna partícula, aunque podría haberla en el caso de que en el tambor utilizado en el ensayo Slake Durability Test exista alguna imperfección. En el cazo colocado en la parte inferior, quedan depositadas aquellas partículas finas de diámetro inferior a 0.08 mm que no han conseguido ser eliminadas en el proceso de lavado de finos.

El material retenido en cada tamiz, una vez pesado, se coloca cuidadosa y ordenadamente en una bandeja tal como se muestra en la Figura 5.2.51, donde de izquierda a derecha se observa el material retenido en los tamices de 2mm, 1.25 mm, 0.40 mm, 0.16 mm y el depositado en el cazo inferior.



Figura 5.2.50. Tamizadora mecánica.



Figura 5.2.51. Distribución granulométrica del material depositado en la cubeta.

Cálculos y resultados

Tomamos como muestra total la diferencia entre el peso de la muestra inicial formada por 10 fragmentos utilizada en el ensayo Slake Durability Test y el peso de esa misma muestra tras la aplicación de 6 ciclos de humedad-secado.

En la obtención de la curva granulométrica de esta muestra, dado que es una muestra arcillosa, se entiende que todos los fragmentos son desmenuzables a un tamaño inferior a 2 mm y que, por tanto, consideramos que el porcentaje de material que pasa por los tamices de 2 mm de abertura y superiores es del 100 % en todos los casos. De este modo obtenemos la curva granulométrica (Figura 5.2.52).

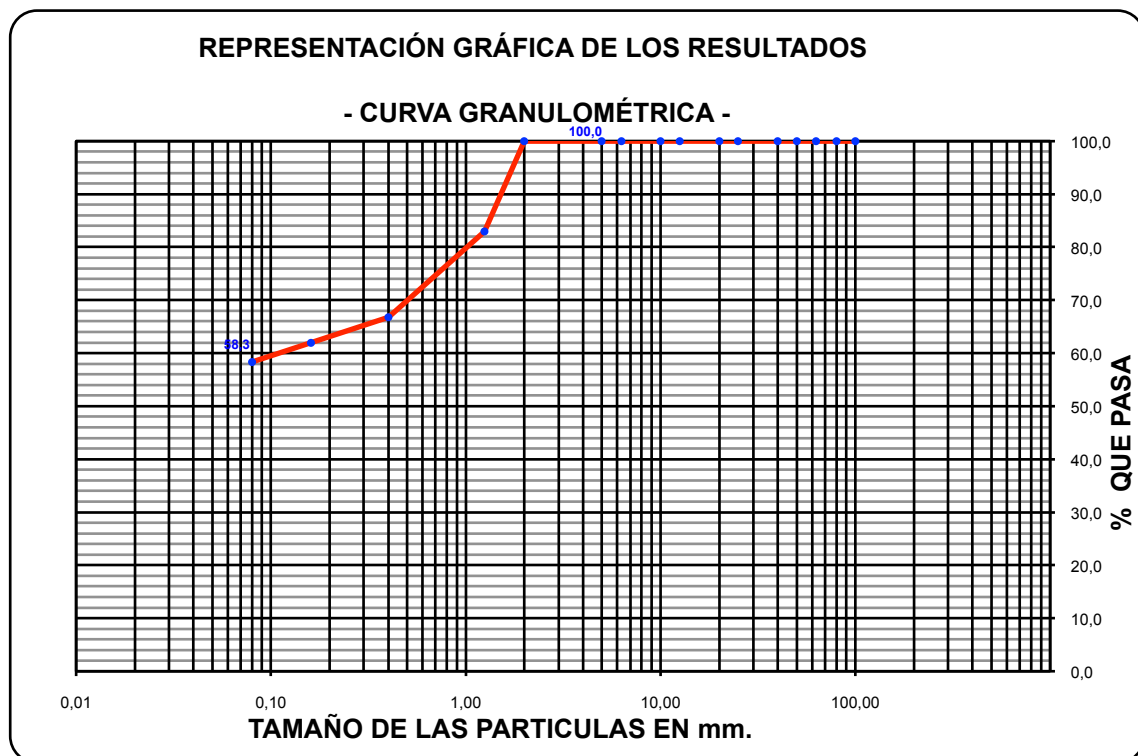


Figura 5.2.52. Curva granulométrica de los depósitos del SDT.

A su vez es útil obtener la composición granulométrica, según la Clasificación S.U.C.S, tal como se observa en la tabla 5.2.1.




COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (Clasificación S.U.C.S.)			
GRAVAS (RETIENE 5 mm)		0.0	%
ARENAS (PASA 5 Y RET 0,08 mm)		41.7	%
ARCILLAS Y LIMOS (PASA 0,08 mm)		58.3	%

Tabla 5.2.1. Composición granulométrica (Clasificación S.U.C.S.)

5.3.2.3 Ensayos de granulometría por sedimentación

Introducción

El objeto de este ensayo es la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de un suelo de tamaños entre 2 y 80 μm mediante el método del densímetro.

La normativa consultada para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103102:1995 – Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.

Preparación de la muestra

Se tomó una cantidad de 40.41 gramos de suelo seco con partículas de tamaño inferior a 2 mm, obtenida mediante tamizado para dispersarla introduciéndola en un vaso de precipitados y añadiendo 125 ml de solución de dispersión de hexametáfosfato sódico. Se dejó en reposo por un tiempo mínimo de 18 horas agitándose periódicamente.

La suspensión resultante se introdujo en un frasco de agitación que se rellenó con agua destilada hasta 5 cm del borde del frasco y se colocó en el aparato agitador y se puso en marcha durante un minuto.

Realización del ensayo

Se extrajo el frasco del agitador y se volcó su contenido en una probeta graduada y se rellenó con agua destilada hasta la cantidad de 1 litro. Se agitó vigorosamente y se introdujo el densímetro, comprobando que este flotara libremente, a la vez que se puso en marcha el cronómetro (Figura 5.2.53).

Se anotaron las lecturas leídas en el vástago del densímetro (R_h) a los tiempos de 0.5, 1, 2, 5, 10, 15,30, 60, 120, 240 y 1440 minutos (Figura 5.2.54).



Figura 5.2.53. Inicio del ensayo de análisis granulométrico por sedimentación.



Figura 5.2.54. Ensayo de granulometría por sedimentación.

Resultados

Se calcula la lectura verdadera, R, por medio de la expresión:

$$R = R_h + C_m + C_t - C_d$$

donde:

C_m es la corrección por menisco y se calcula anotando las lecturas en la parte central (de mayor curvatura) y en el extremo de una probeta llena de agua destilada, siendo el valor C_m la diferencia entre ambas lecturas (Figura 5.2.55).

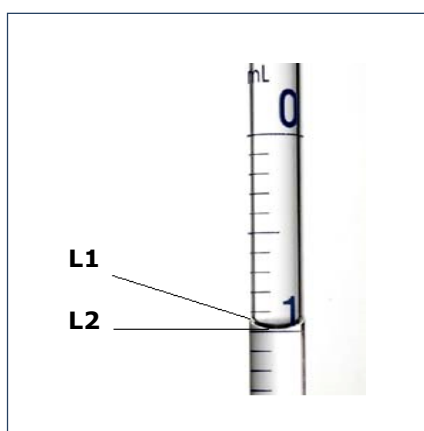


Figura 5.2.55. Obtención de la corrección por menisco.

C_t es la corrección por temperatura, que se obtiene introduciendo la temperatura medida en el interior del líquido contenido de la probeta en la siguiente tabla (Tabla 5.2.2).

T (°C)	C_T	T (°C)	C_T
7	-0.0013	20	+0.0000
8	-0.0013	21	+0.0002
9	-0.0013	22	+0.0004
10	-0.0013	23	+0.0006
11	-0.0012	24	+0.0008
12	-0.0012	25	+0.0010
13	-0.0011	26	+0.0013
14	-0.0009	27	+0.0015
15	-0.0008	28	+0.0018
16	-0.0006	29	+0.0020
17	-0.0005	30	+0.0023
18	-0.0003	31	+0.0026
19	-0.0002	32	+0.0030

Tabla 5.2.2. Valores de corrección por temperatura.

C_d es la corrección por dispersante, que se calcula introduciendo agua destilada en una probeta graduada y agua destilada con dispersante en otra, anotando las lecturas. El valor de C_d es la diferencia entre estas lecturas (Figura 5.2.56).

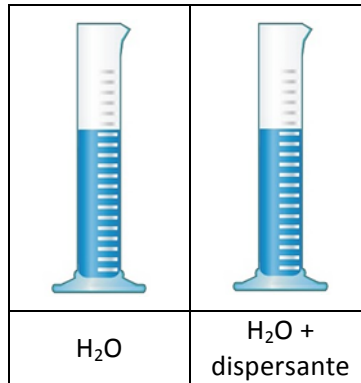


Figura 5.2.56. Corrección por dispersante.

A partir del calibrado del densímetro (Figura 5.2.57) obtenemos la siguiente expresión:

$$H_i = -2.031 \cdot R_h + 107.62$$

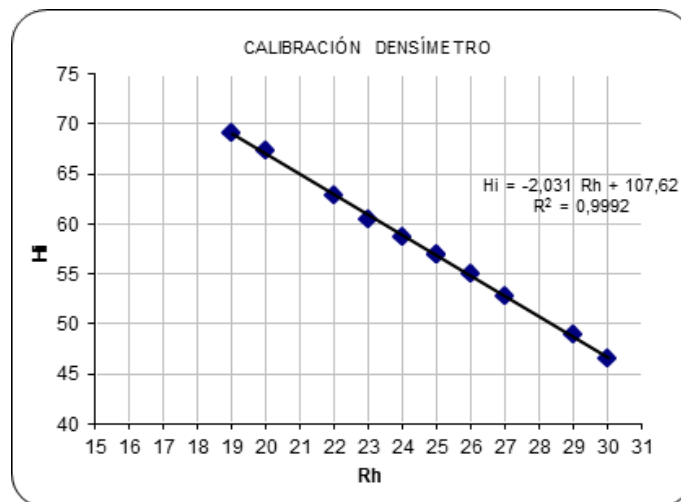


Figura 5.2.27. Gráfica del calibrado del densímetro.

Lo cual nos es útil para calcular la profundidad efectiva H_r correspondiente a cada R_h , mediante la siguiente expresión:

$$H_{ri} = H_i + 0.5 \cdot (h - VA)$$

donde:

Capítulo 5. Metodología

$A = 56$ ml es el área de la sección recta del densímetro,

$h = 180$ mm es la altura del bulbo y

$V = 56$ ml es el volumen del bulbo.

Dado que las partículas arcillosas no son totalmente esféricas, es necesario calcular el diámetro equivalente:

$$D = 0.005531 \cdot \eta \cdot H \cdot R \cdot G_s - 1 \cdot t$$

donde

η es la viscosidad del agua en mPa·s, a la temperatura del ensayo y que se obtiene realizando una interpolación lineal entre los valores de la siguiente tabla (Tabla 5.2.3).

Temperatura (°C)	Viscosidad (mPa·s)
10	1.304
15	1.137
20	1.002
25	0.891
30	0.798

Tabla 5.2.3. Viscosidad del agua en función de la temperatura.

G_s es la densidad relativa de las partículas del suelo.

t es el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo hasta finalizar éste, expresado en minutos

Por último obtenemos el porcentaje en masa de las partículas con un diámetro inferior a un determinado diámetro equivalente, según la siguiente expresión:

$$N = G_{smd} \cdot (G_s - 1) \cdot R \cdot 100$$

y de esta forma obtenemos la curva granulométrica de la fracción fina del suelo margoso ensayado (Figura 5.2.58).

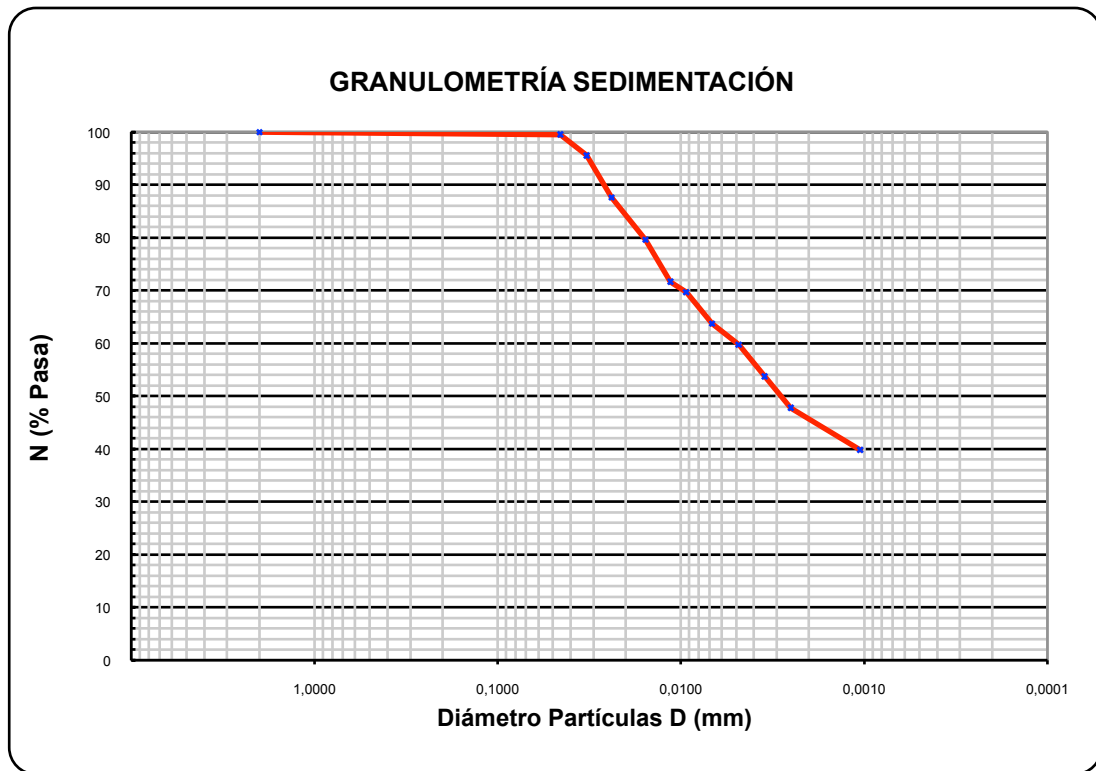


Figura 5.2.58. Curva granulométrica de la fracción fina.

5.3.2.4 Densidad relativa de las partículas

Introducción

El objeto de este ensayo es la determinación de la densidad relativa de las partículas menores de 5 mm de un suelo.

La densidad relativa de las partículas (G_s) es el cociente entre la densidad de las partículas sólidas y la densidad del agua a 20 °C de temperatura:

$$G_s = \rho_s / \rho_w$$

A su vez la densidad de las partículas del suelo (ρ_s) se define como el cociente entre la masa de la fase sólida de la muestra y el volumen que ésta ocupa:

$$\rho_s = M_s / V_s$$

La norma consultada para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.102/94: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.

Preparación de la muestra

Se hacen pasar mediante machaqueo en mortero, aproximadamente 50 gramos de la muestra por el tamiz de abertura 5 mm y se secan a 110 °C hasta que adquieren un peso constante. Se vuelve

Capítulo 5. Metodología

a machacar hasta que todo pasa por el tamiz de abertura 400 μm . De esta masa de material, se obtienen 3 porciones de aproximadamente 15 gramos cada una.

Realización del ensayo

Se prepara el baño termostático a una temperatura de entre 20 y 25 $^{\circ}\text{C}$ y para cada una de las porciones de aproximadamente 15 gramos, obtenidas anteriormente, se sigue el siguiente procedimiento:

Se referencia el picnómetro y se llena de agua destilada hasta por encima de la línea de enrase y se expulsan las burbujas de aire ocluido que haya en el interior. Se introduce en el baño termostático y se mantiene durante una hora. Se enrasa dentro del baño, se extrae y se seca. Se pesa el picnómetro en una balanza de precisión de 0.001 g, de modo que obtenemos el valor M_1 (masa del picnómetro lleno de agua hasta el enrase y con cuello).

Se retira el cuello y se vacía aproximadamente hasta la mitad. Se seca con ayuda de un paño o papel de filtro y pesa, obteniéndose así el valor M_2 (masa del picnómetro sin cuello lleno de agua hasta la mitad).



Capítulo 5. Metodología

Se introducen los 15 gramos de muestra y se pesa de nuevo, obteniéndose el valor M_3 (masa del picnómetro, sin cuello y lleno de agua hasta la mitad más la muestra).

Se coloca el cuello y se eliminan las burbujas de aire ocluido hirviendo el picnómetro durante 15 minutos. Se rellena con agua destilada hasta el enrase, se coloca en el baño termostático de nuevo durante una hora y se enrasa dentro del baño.

Se retira, se seca y se pesa en la balanza de precisión 0.001 gramos (Figuras 5.2.59 y 5.2.60), de forma que obtenemos la masa M_4 (masa del picnómetro más la muestra y lleno de agua hasta el enrase).



Figura 5.2.60. Aspecto de los picnómetros al finalizar el ensayo.

Resultados

Con los 4 valores obtenidos (M_1 , M_2 , M_3 y M_4) obtenemos la densidad relativa de las partículas del suelo mediante la siguiente expresión:

$$G = \frac{M_3 - M_2}{M_3 - M_2 + (M_1 - M_4)}$$

Dado que este ensayo se realiza por triplicado, se adoptará como densidad relativa de las partículas la media aritmética de los resultados obtenidos con las tres porciones ensayadas. La densidad relativa de un suelo, G , se refiere a la densidad del agua a 20 °C. Por tanto, si la temperatura del agua con la que se realiza este ensayo difiere de este valor, será necesario multiplicar el valor de la densidad relativa anteriormente obtenido por un coeficiente de corrección K_t , el cual se obtiene de la tabla 5.2.4.

Temperatura en °C	Coefficientes K_1	Densidad agua en g/cm ³
20	1.0000	0.9982343
21	0.9998	0.9980233
22	0.9996	0.9978019
23	0.9993	0.9975702
24	0.9991	0.9973286
25	0.9988	0.9970770

Tabla 5.2.4. Valores de K_1 , a diferentes temperaturas.

5.3.2.5 Límite Líquido

Introducción

El límite líquido de un suelo, a efectos de este ensayo, se define como el contenido de humedad para el cual dos secciones de un suelo amasado con agua, separadas por un surco creado a lo largo del fondo de la Cuchara de Casagrande, llegan a unirse con una longitud de 13 mm, tras la ejecución de 25 golpes en la Cuchara de Casagrande a razón de dos golpes por segundo.

La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.103 / 1994: Determinación del Límite Líquido de un suelo por el Método del aparato de Casagrande.

Preparación de la muestra

Para la realización de este ensayo se requieren de 150 a 200 gramos de material que pasa por el tamiz 400 μm UNE 7 050. Para ello, por cuarteo, se separa una cantidad aproximada a la requerida (figura 5.2.61) y se machaca en su totalidad mediante el uso del mortero (figura 5.2.62), con la finalidad de que la muestra obtenida sea representativa del terreno, no descartando los fragmentos o partículas que opongan mayor resistencia a su desmenuzamiento.

Una vez se ha pulverizado cierta cantidad de material (figura 5.2.63), se vuelca sobre el tamiz y se agita horizontalmente para que el tamiz sea atravesado por la totalidad de partículas con un diámetro inferior a 400 μm (figura 5.2.64). La fracción de material que queda retenida por el tamiz se devuelve al mortero y se machaca de nuevo hasta alcanzar el tamaño máximo de partículas requerido.

Una vez se tiene la suficiente cantidad de material en el cazo (figura 5.2.65), se toman 200 gramos del mismo y se amasan con agua hasta formar una pasta, que se introduce en un tarro con el uso de una espátula y se guarda en cámara húmeda durante 24 horas para que se homogenice la humedad.

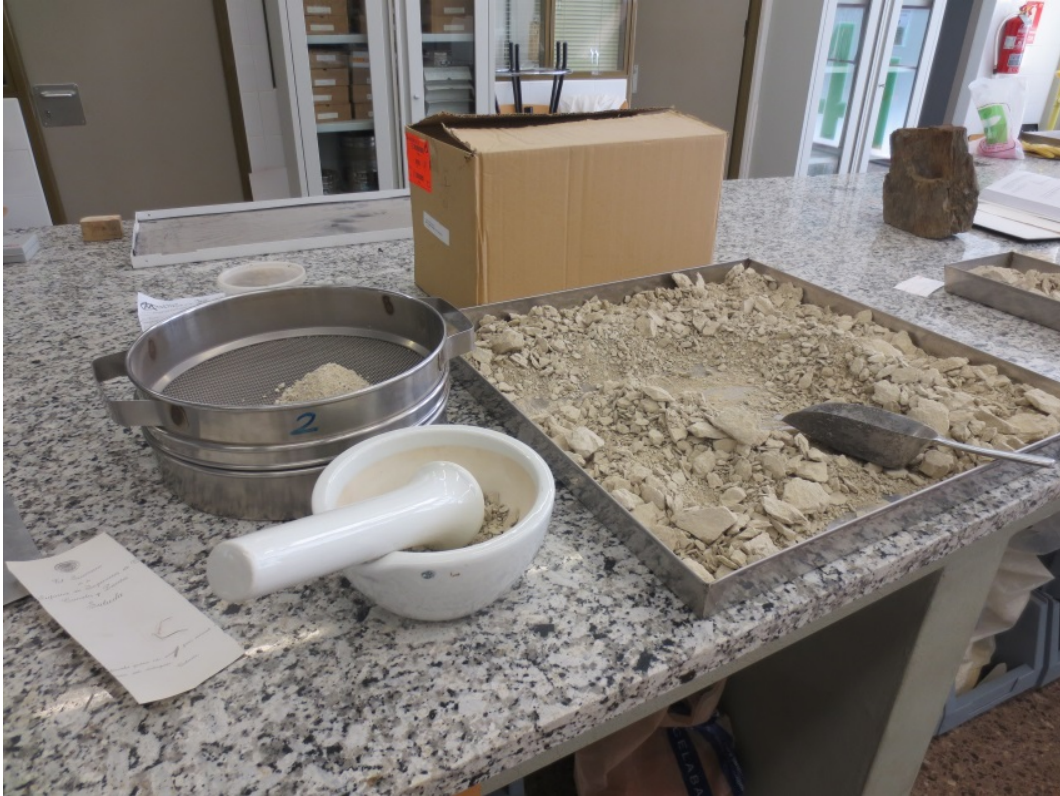


Figura 5.2.61. Selección de la muestra.



Figura 5.2.62. Machaqueo de la muestra.



Figura 5.2.63. Muestra pulverizada.



Figura 5.2.64. Tamizado de la muestra.



Figura 5.2.65. Material que pasa por el tamiz 400 μm UNE 7 050.

Realización del ensayo

Una vez transcurridas 24 horas, se extrae el tarro de la cámara húmeda y, con la ayuda de una espátula de gato, se coloca una porción de la muestra sobre la Cuchara de Casagrande, de forma que tenga aproximadamente una altura de un centímetro en su punto de mayor espesor y cubra dos tercios de la superficie de la cuchara (figura 5.2.66), evitando oquedades y burbujas de aire, ya que la presencia de las mismas puede alterar los resultados.

Cuando la muestra está de esta forma dispuesta, se realiza un surco en su mitad y en sentido de arriba hacia abajo con el acanalador de Casagrande y se procede a girar la manivela, de forma que la cuchara realice un golpeteo sobre la base del aparato a razón de dos golpes por segundo, hasta que el surco se cierre en una longitud de 13 mm. Se anota el número de golpes necesario y se toma una porción de muestra que se coloca sobre un pesamuestras de porcelana, previamente pesado. Se pesa el conjunto y se introduce en la estufa para eliminar toda el agua de la muestra y determinar su humedad (figura 5.2.67).



Figura 5.2.66. Muestra sobre la Cuchara de Casagrande.



Figura 5.2.67. Porción de muestra secada en estufa.

Capítulo 5. Metodología

Para que la determinación sea válida, el número de golpes necesarios para que el surco se cierre 13 mm debe estar comprendido entre 15 y 35. Para la correcta obtención de resultados del ensayo se necesitan, al menos, una determinación entre 25 y 15 golpes y otra entre 35 y 25 golpes.

Entre ambas determinaciones y al finalizar el ensayo, se deberá limpiar la cuchara extrayendo el material sobrante con las manos, evitando utilizar para este fin cualquier instrumento metálico como la espátula, de forma que la superficie de la cuchara no se ralle o deteriore.

Resultados

Se representan en un gráfico de doble escala logarítmica, el número de golpes (eje de ordenadas) frente a la humedad (eje de abscisas) y se sitúan en ella los puntos obtenidos a partir del ensayo (Figura 5.2.68).

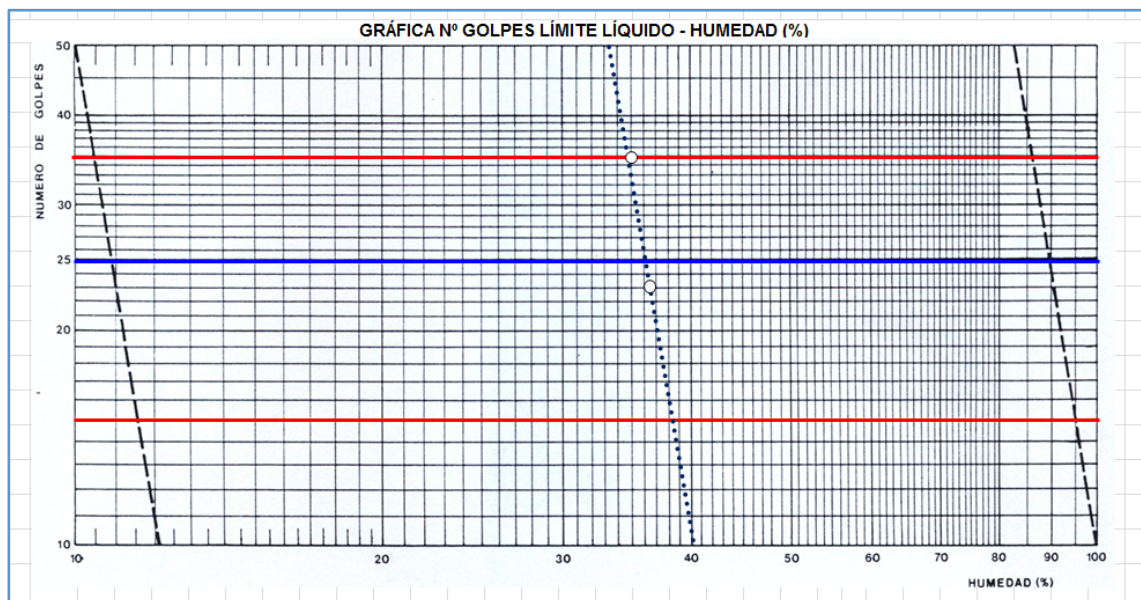


Figura 5.2.68. Obtención de la humedad del límite líquido.

Se traza una recta paralela a las de referencia, es decir, de pendiente 0,117 que equidiste de ambos puntos. Obtenemos un tercer punto como intersección de esta recta y la horizontal que corresponde a 25 golpes. El límite líquido será la humedad que le corresponde a este último punto.

5.3.2.6 Límite Plástico

Introducción

El límite plástico de un suelo, a efectos de este ensayo, se define como la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelo de unos 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos cilindros se desmoronen. La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.104 / 1993: Determinación del Límite Plástico de un suelo.

Preparación de la muestra

Se usa parte de la masa preparada para la determinación del límite líquido.

Realización del ensayo

Se moldea, en forma de elipsoide, un fragmento de la muestra y, a continuación, se rueda con suavidad entre los dedos de la mano y una placa de cristal esmerilado formando un cilindro. El cilindro tendrá un contenido de humedad correspondiente al límite plástico si, cuando alcanza un diámetro de 3 mm, se resquebraja. Si una vez ha alcanzado este diámetro no se resquebraja, es necesario reamasar y repetir el proceso, dado que su contenido en humedad es superior al correspondiente al límite plástico. En caso contrario, es decir, si el cilindro se resquebraja antes de llegar a ese diámetro, tenemos un contenido de humedad inferior al del límite plástico y, por lo tanto, es necesario humedecer el fragmento y repetir el proceso hasta que el cilindro se agriete cuando llega a los 3 mm de diámetro.

La porción obtenida se introduce en un pesamuestras de porcelana previamente pesado. Se pesa el conjunto y se introduce en la estufa para eliminar toda el agua de la muestra y determinar su humedad (figura 5.2.69).

Resultados

Para una correcta realización del ensayo se requieren, al menos, dos determinaciones del límite plástico que no difieran entre sí en más de dos puntos porcentuales de humedad y el valor del límite plástico se obtendrá como la media aritmética de los valores obtenidos en cada determinación.



Figura 5.2.69. Porción de muestra secada en estufa.

5.3.2.7 Límite de retracción

Introducción

Este ensayo tiene por objeto la determinación del límite de retracción, de la relación de retracción, y de la retracción volumétrica de un suelo, utilizando para ello muestra remoldeada.

La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103 108: Determinación de las características de retracción de un suelo.

Procedimiento operatorio

Calibrado de la cápsula de retracción.

Se lava, se seca y se determina la masa de la cápsula de retracción, M_1 , expresándola en gramos, con una precisión de 0.01 g.

Se determina la capacidad de la cápsula de retracción en centímetros cúbicos, que también es el volumen de la pastilla de suelo húmedo. Para ello se opera como se indica a continuación:

Se vierte un poco de agua en la cápsula metálica, en cantidad suficiente para cubrir el mercurio que se vaya a desplazar, y que así no se produzcan vapores. Se coloca la cápsula de retracción en el interior de la metálica, y se llena aquella con mercurio hasta que rebose. Se presiona la lámina plana, con las puntas hacia abajo, contra la superficie de la cápsula de retracción, empezando por

Capítulo 5. Metodología

un lateral y finalizando sobre toda la superficie para que se desplace el exceso de mercurio, teniendo cuidado de que no quede aire ocluido. Se retira cuidadosamente la lámina y se determina la masa de la cápsula de retracción más el mercurio, M_2 , expresándola en gramos con una precisión de 0.01 g.

Se calcula el volumen de la pastilla de suelo húmedo, V_1 , expresándola en centímetros cúbicos, con una cifra decimal, como sigue:

$$V_1 = \frac{M_2 - M}{13.6}$$

donde 13.6 g/cm³ es la densidad aproximada del mercurio.

Se vacía la cápsula de retracción, se lava, se seca y se aplica una ligera película de grasa a sus paredes interiores.

Preparación de la pastilla de suelo

Se toman unos 100 g del material que pasa por el tamiz 400 μm Norma UNE 7 050-2, preparado como se indica en la Norma UNE 103 100, y se introducen en la cápsula metálica.

Se le añade agua destilada en cantidad suficiente para que la pasta de suelo que se forme alcance una humedad w_1 , comprendida entre la correspondiente al límite líquido, w_l , determinado como se indica en la Norma UNE 103 103, y un 10% por encima de ese valor.

Se coloca un poco de esa pasta de suelo en la cápsula de retracción, de forma que ésta se llene en algo más de la tercera parte de su volumen. se golpea la cápsula verticalmente varias veces sobre una superficie no muy rígida, para eliminar toda posible burbuja de aire ocluida. Se añade otra porción de suelo, aproximadamente igual a la anterior, y se repite la operación de golpeo hasta eliminar totalmente el aire. Se añade finalmente otra porción igual de suelo hasta que rebose, y se repite el proceso anterior. Se elimina el exceso de suelo, enrasando con la regla de acero.

De esta manera se obtiene una pastilla de suelo en el interior de la cápsula de retracción.

Se debe limpiar con cuidado todo vestigio de suelo que haya podido quedar adherido al exterior de la cápsula de retracción.

Realización del ensayo

Finalizadas las operaciones descritas en el apartado anterior, se determina la masa de la cápsula de retracción más la pastilla húmeda, M_3 , en gramos, con una precisión de 0.01 g.

Si se desea obtener la curva de retracción durante el secado, se procede como se indica a continuación:

Capítulo 5. Metodología

Se deja la pastilla en la cápsula de retracción expuesta al aire durante unas horas, permitiendo el secado parcial. Cuando se separe de las paredes de dicha cápsula y su consistencia permita su manipulación, se retira de la cápsula de retracción y se mide su volumen.

Para determinar el volumen de la pastilla de suelo seco se procede como sigue:

Se coloca el recipiente de vidrio en el interior de la cápsula de porcelana. Se vierte un poco de agua en ésta, para que no se produzcan vapores de mercurio en las manipulaciones posteriores. Se llena completamente con mercurio el recipiente de vidrio y se elimina su exceso, presionando con la lámina plana firmemente sobre la superficie del recipiente. No se debe dejar en esta operación nada de aire atrapado bajo dicha lámina.

Se retira con cuidado la lámina plana y se limpia su superficie exterior. Se transfiere el recipiente con el mercurio a otra cápsula de porcelana bien limpia, sin perder en este proceso nada de su contenido.



Figura 5.2.70. Mercurio desplazado por la pastilla de suelo.

Se sitúa la pastilla de suelo sobre la superficie del mercurio, y con mucho cuidado se introduce aquella en éste, empujando una superficie circular plástica plana. Se presiona firmemente con dicha lámina sobre la superficie del recipiente de vidrio, asegurándose de que no quede nada de aire atrapado. Se retiran, la lámina, la pastilla de suelo, y el recipiente de vidrio con el mercurio sobrante. Se determina la masa del mercurio desplazado, M_i , (Figura 5.2.70) en gramos con una precisión de 0.01 g. Se calcula el volumen de la pastilla de suelo V_i , en cm^3 con una cifra decimal, mediante la siguiente expresión:

$$V_i = M_i / 13.6$$

A continuación se determina la masa de la pastilla, en gramos, con una precisión de 0.01 g.

Se coloca la pastilla sobre una superficie plana y se continúa el proceso de secado al aire. Se hace una nueva determinación del volumen y de la masa.

Se repiten los dos pasos anteriores hasta que el volumen medido sea prácticamente constante. Normalmente cinco o seis puntos son suficientes.

Resultados

- Humedad. Se calcula la humedad de amasado de la pastilla de suelo remoldeado, como sigue:

$$w\% = \frac{M_3 - M_1}{M_4 - M_1} \cdot 100$$

- Límite de retracción. El límite de retracción de un suelo, w_s , es la humedad máxima en la cual, una reducción del contenido de agua no produce una disminución de volumen de la masa de suelo. Para obtenerlo con cada medida de volumen, V_i , y de la masa, M_i , de la pastilla de suelo durante el proceso de secado al aire, se calcula el volumen que correspondería a 100 g de suelo seco, U_i , en centímetros cúbicos, mediante la expresión:

$$U_i = V_i \cdot M_d \cdot 100$$

Se calcula la humedad, w_i , en %, en cada medida, mediante la expresión:

$$w_i = \frac{M_i - M_d}{M_d} \cdot 100$$

Se representan los valores de U_i en ordenadas, en función de la humedad, w_i , en abscisas, en doble escala decimal (Figura 5.2.71).

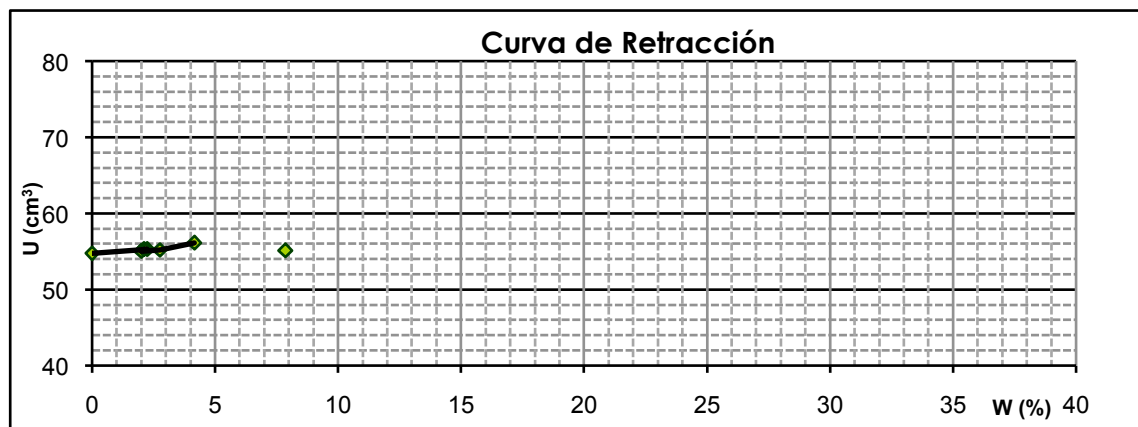


Figura 5.2.71. Curva de retracción.

Se trazan, una paralela al eje de abscisas por el punto U_d , es decir el último punto obtenido al secar la muestra en estufa, y una línea recta, que pase a través del primer punto U_1 que mejor se ajuste a la serie de puntos correspondientes a las primeras lecturas. se toma como límite de retracción, w_s , al valor de la abscisa correspondiente al punto de corte de ambas rectas, expresado con una cifra decimal.

- Relación de retracción. La relación de retracción de un suelo, es la relación que hay entre un determinado cambio de volumen expresado como un porcentaje del volumen seco, y el cambio correspondiente de humedad por encima de la humedad correspondiente al límite de retracción.

Se calcula la relación de retracción R_s , mediante la siguiente expresión:

$$R_s = \frac{M_4 - M_1}{V_d \cdot \rho_w}$$

- Retracción volumétrica. La retracción volumétrica de un suelo, es la reducción de volumen que experimenta una masa de suelo, expresada como porcentaje, cuando su humedad disminuye desde un valor w , hasta el correspondiente al límite de retracción.

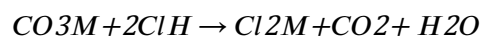
Se calcula la retracción volumétrica V_s , mediante la expresión siguiente:

$$V_s = w - w_s R_s$$

5.3.2.8 Contenido en carbonatos

Introducción

Este ensayo tiene por objetivo la determinación del contenido de carbonatos en un suelo. Para ello se emplea el método del calcímetro de Bernard, fundado en la descomposición de los carbonatos por la asociación del ácido clorhídrico, en la manera en que lo expresa la siguiente fórmula:



La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103-200-93: Determinación del contenido de carbonatos en los suelos y NLT-116/91: Determinación del contenido de carbonatos en los suelos.

Preparación de la muestra

Se hace pasar el material por el tamiz de abertura 250 μ m hasta que obtengamos una cantidad aproximada a 10 gramos y se lleva a estufa a una temperatura de entre 105 y 115 °C hasta que la muestra pierda toda su humedad.

Procedimiento de ensayo

Para la realización de este ensayo se utiliza el calcímetro de Bernard (Figura 5.2.72) que está compuesto por los siguientes elementos:

- a) Soporte adecuado.
- b) Tubo bureta de 100 cm³ de capacidad, graduado en 0.2 cm³.
- c) Tubo de nivel con depósito.
- d) Matraz Erlenmeyer, de unos 200 cm³, con un tapón de goma atravesado por un tubo de vidrio.
- e) Tubo de vidrio cerrado por un extremo, de longitud algo menor que el diámetro del fondo del matraz y de unos 3 cm³ de capacidad
- f) Tubo de vidrio con el otro extremo conectado a la bureta con el fin de equilibrar la presión



Tarado del ap

Se llena el tubo de nivel y la bureta con la disolución de cloruro sódico

Se toman aproximadamente 0.2 g de carbonato cálcico puro previamente secado en estufa hasta masa constante.

Se introduce el carbonato cálcico, dentro del matraz Erlenmeyer, de forma que caiga en el fondo y ninguna partícula quede en las proximidades de la boca. Si quedasen partículas adheridas al papel, arrastrarlas dentro del matraz por medio de golpecitos o usando un pincel si fuera necesario.

El siguiente paso es llenar el tubo de vidrio con una disolución de ácido clorhídrico por medio de una pipeta o cuentagotas (Figura 5.2.73), procurando que no quede ácido en la parte exterior del tubo. En caso de que caiga algo, lavar el tubo por fuera con un frasco lavador.



Figura 5.2.73. Llenado del tubo de vidrio con disolución de ácido clorhídrico.

Se mueve el depósito del tubo de nivel para que quede enrasado el nivel de la disolución con el de la bureta en la división cero.

Manteniendo el tubo de nivel fijo, con la otra mano se toma el tapón de goma y se cierra el matraz apretándolo para que ajuste bien. Se enrasa de nuevo el tubo de nivel y se realiza la lectura de las divisiones de la bureta donde se ha conseguido el enrase.

Se mueve el matraz para que el tubo vuelque y vacíe el ácido, el cual empezará a reaccionar con el carbonato. Es necesario que toda la muestra tome contacto con el ácido.

Se desplaza el tubo de nivel lo necesario para enrasar con el nivel de solución en la bureta hasta que se estabilice en una lectura. Cuando hayan transcurrido de dos a tres minutos con el enrase mantenido en la misma lectura de la bureta se anota ésta.

Capítulo 5. Metodología

Ensayo con la muestra

Se procede igual que en el tarado, pero en vez de carbonato cálcico se emplea la muestra de suelo previamente preparada.

Resultados

Por diferencia entre la lectura final de la bureta y la inicial se obtienen los centímetros cúbicos de anhídrido carbónico gaseoso producido en la reacción.

El contenido de carbonatos de la muestra, expresado en tanto por ciento de carbonato cálcico, se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$\% \text{ de carbonato cálcico} = 0.2 \cdot v \cdot g \cdot V \cdot 100$$

donde:

0.2 son los gramos de carbonato cálcico empleado en el tarado;

v es el anhídrido carbónico medido en el ensayo de la muestra en centímetros cúbicos;

g son los gramos de muestra ensayada;

V es el anhídrido carbónico medido en el ensayo de tarado con CO_3Ca en centímetros cúbicos.

5.3.2.9 Contenido en materia orgánica

Introducción

Este ensayo tiene por objeto determinar el contenido de materia orgánica oxidable de un suelo mediante permanganato potásico. En este método se determina el porcentaje de materia orgánica de la muestra como cociente entre los centímetros cúbicos de solución de permanganato 0,1 N gastados, multiplicados por el factor de normalidad, y los gramos de muestra ensayados.

Preparación de la muestra

Se machaca una pequeña cantidad de muestra (unos 15 gramos) y se hacen pasar por el tamiz 160 μm UNE 7 050. Se seca en estufa a 110 °C durante 24 horas.

Procedimiento operatorio

- 1) Se toman de la muestra 2 porciones de aproximadamente 0,25 g a las que denominaremos M_1 y M_2 . Se introduce cada una de las porciones en un matraz Erlenmeyer de 500 cm³ de capacidad y se añaden 25 cm³ de ácido sulfúrico al 9 %.
- 2) Se calienta hasta ebullición (figura 5.2.74). Se deja hirviendo durante 3 minutos y se añaden 1,5 cm³ de ácido nítrico concentrado. Se deja hervir durante 2 minutos más.



Figura 5.2.74. Muestra con ácido sulfúrico llevados a ebullición.

- 3) Se añaden una disolución de 125 cm³ de agua destilada con 25 cm³ de permanganato potásico 0,1 N. Se deja calentar durante 5 minutos (figura 5.2.75).

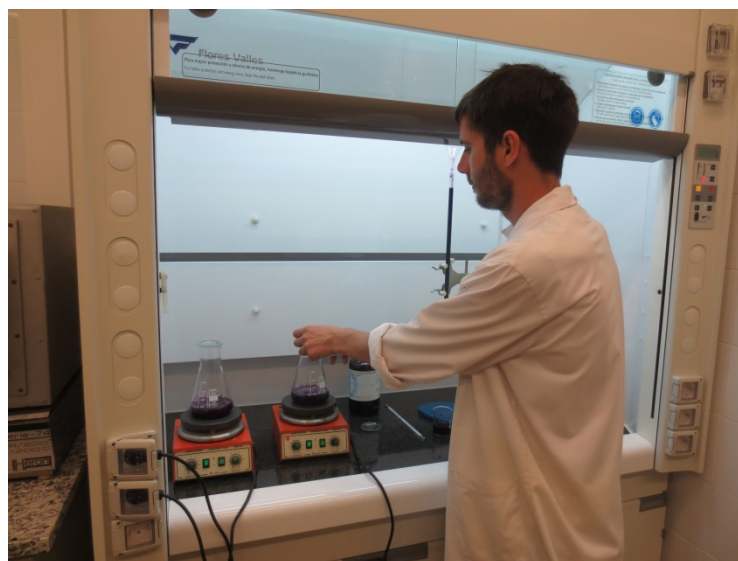


Figura 5.2.75. Matrazes erlenmeyer con la disolución de permanganato potásico.

- 4) Se añade con una bureta (figura 5.2.76) 19,5 cm³ de ácido oxálico 0,1 N. Se retiran los matraces del agitador y se deja enfriar hasta 70-80°C.



Figura 5.2.76. Bureta de ácido oxálico.

- 5) Se valora el exceso de ácido oxálico con solución de permanganato potásico 0,1 N hasta que adquiere una coloración magenta claro. Se anotan los centímetros cúbicos de la solución de permanganato potásico 0,1 N empleados en la valoración.

Resultados

El contenido en materia orgánica, expresada en tanto por ciento, de cada porción de muestra ensayada, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MO=0,1032 \cdot C \cdot fM$$

siendo:

C los centímetros cúbicos de solución de permanganato potásico empleados en la valoración.

f el factor de normalidad del permanganato potásico, que en este caso tiene un valor de $f = 0,970$.

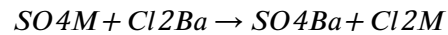
M los gramos de la muestra ensayada.

El contenido de materia orgánica de la muestra total de suelo ensayada expresada en tanto por ciento, es la media aritmética de las dos determinaciones anteriores.

5.3.2.10 Contenido en sulfatos solubles

Introducción

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de sulfatos solubles de las margas arcillosas objeto de este estudio. En líneas generales consiste en disolver parte de la muestra mediante agitación con agua y precipitar los sulfatos disueltos con solución de cloruro bórico, según la siguiente reacción:



La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: NLT-120/72: Contenido de sulfatos solubles en los suelos.

Preparación de la muestra

La muestra analizada en este ensayo son aproximadamente 10 gramos que pasan por el tamiz de abertura 0.40 mm secados entre 75 y 80 °C y pesados con una balanza de precisión 0.01 gramos.

Realización del ensayo

El procedimiento para la realización de este ensayo consiste en el desarrollo de cuatro procesos: disolución de sulfatos, precipitación, filtrado y calcinación.

- *Disolución de sulfatos.* Se introduce la muestra en un frasco para agitación de 1000 cm³ y se añaden 500 cm³ de agua destilada. Se coloca el frasco en el agitador y se pone en marcha durante 45 minutos. Se retira el frasco del agitador y se deja decantar. Si el líquido no clarifica se le añaden dos gotas de ácido clorhídrico. Una vez se ha producido la decantación y el líquido está claro, se extraen con pipeta 250 cm³ del líquido clarificado, medidos exactamente en un matraz aforado. Se filtra el líquido contenido en el matraz recogiendo el líquido filtrado sobre un vaso de 600 cm³. Se lava el matraz con agua destilada y se filtra esta agua de lavado con el fin de recoger las partículas que puedan haber quedado adheridas a las paredes. Se añaden 20 cm³ de ácido clorhídrico N/20.
- *Precipitación de los sulfatos.* Se calienta a ebullición el líquido contenido en el vaso de 600 cm³ y se precipita añadiendo con una pipeta una disolución de cloruro bórico al 10 % hasta que no se produzca más precipitado. Este precipitado en caso de formarse, tiene un aspecto lechoso.
- *Filtrado de los sulfatos.* Tras la ebullición se filtra el líquido empleando un filtro de cenizas conocidas. Primero se filtra el líquido claro y después se lava el frasco con agua destilada y caliente y se filtra esta agua de lavado también con el objetivo de arrastrar el precipitado al filtro. Se comprueba que el líquido filtrado no da precipitado con una solución de nitrato de plata (1.7 g en 100 cm³ de agua).

Capítulo 5. Metodología

- *Calcinación.* Se coloca el papel de filtro en un crisol previamente tarado en una balanza de precisión 0.001 g (Figura 5.2.77) y se introduce el conjunto en un horno de calcinación eléctrico (Figura 5.2.78) durante 15 minutos a una temperatura de entre 800 y 900 °C.



Figura 5.2.77. Balanza de precisión 0.001 g.

Se extrae el crisol y se pesa de nuevo.

Resultados

El peso del precipitado de sulfato de bario se obtiene como la diferencia del peso del crisol con el precipitado en su interior tras la calcinación a 800 °C y el peso del crisol.

El porcentaje de sulfatos solubles se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\%SO_3 = (P_p \cdot 0.34299) P_m \cdot 100$$

Donde:

P_p es el peso del precipitado de sulfato de bario

P_m es el peso de la muestra analizada, calculándose mediante la siguiente expresión:

$P_m = \text{cm}^3$ solución analizada cm^3 agua en el frasco \cdot g de suelo en el frasco



Figura 5.2.78. Horno de calcinación eléctrico.

5.3.2.11 Conductividad eléctrica

Introducción

Este ensayo tiene por finalidad la determinación rutinaria de la conductividad eléctrica específica en un extracto acuoso del suelo. La determinación se realiza para obtener una indicación del contenido de electrolitos del suelo solubles en agua, y es aplicable a todos los tipos de muestras de suelo secadas al aire.

Procedimiento de ensayo

Se trata de obtener un extracto suelo – agua 1/5. Para ello:

- Se seca al aire una muestra de 10 gramos de suelo de la fracción de partículas inferiores a 2 mm.
- Se añade 50 ml de agua destilada y se agita $\frac{1}{2}$ hora en agitador mecánico (Figura 5.2.79)
- Se filtra a través de papel de filtro, y se añade una gota de hexametáfosfato sódico al 0.1 % por cada 25 ml de filtrado (Figura 5.2.80)



Figura 5.2.79. Agitador mecánico.



Figura 5.2.80. Muestras preparadas para realizar las mediciones.

Capítulo 5. Metodología

Con el medidor de pH y conductividad modelo Hanna Instruments HI 9811-5 (Figura 5.2.81) obtenemos la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), el pH, la conductividad eléctrica (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los sólidos totales disueltos (DTS) en mg/L .



Figura 5.2.81. Medición de la conductividad.

Resultados

Para interpretar los resultados hay que tener en cuenta que las medidas de conductividad eléctrica están compensadas automáticamente con la temperatura. El valor TDS en soluciones acuosas es directamente proporcional a la conductividad. El ratio entre los dos parámetros depende de la solución. Este modelo tiene un factor de conversión fijo establecido de 0.5: $1\mu\text{S}/\text{cm}$ equivale a 0.5 mg/L de TDS.

5.3.2.12 Análisis petrográfico

Introducción

Con el objetivo de clasificar las muestras petrográficamente y conocer detalladamente su composición se las rocas han sido descritas en muestra de mano, y posteriormente se ha descrito su mineralogía y microtextura mediante un microscopio de luz polarizada transmitida. Para obtener datos semicuantitativos de la mineralogía y textura se han realizado conteos modales.

El método de trabajo ha consistido en la identificación de la fase mineral que queda ubicada en el cruce de la retícula del microscopio después de cada desplazamiento de la platina de conteo, con el soporte del contador, que nos permite asignar una tecla para cada componente de la roca.

La platina de conteos modales está dotada de un mecanismo que permite que la lámina delgada se desplace de forma constante mediante un intervalo regular, previamente definido en función del tamaño de grano de la muestra, en direcciones x y y ortogonales. Estos desplazamientos Δx y Δy permiten recorrer toda la lámina delgada y crear una malla de puntos regulares (Martínez-Bofill, 2013).

Como se ha indicado el paso de mallo no será constante, sino que depende del tipo de muestra, especialmente de su tamaño de grano. El desplazamiento de la platina debe ser, en general, igual al tamaño más fino de grano visible en la preparación. De esta forma se garantiza la representatividad de todos los componentes de la muestra.

Se han realizado entre 1000 y 2000 puntos de conteo en cada lámina delgada. El criterio ha sido el tamaño de grano, así como también la homogeneidad de la muestra. Así en las muestras más complejas se han realizado 2000 puntos, mientras que en las muestras más homogéneas se han realizado 1000 puntos.

Análisis y clasificación textural

A partir del análisis de las muestras estudiadas, podemos clasificarlas adecuadamente en base a criterios mineralógicos, así como también se clasifican texturalmente mediante granulometría y texturas diferenciadas que permiten separarlas en diferentes grupos.

Se han reconocido una serie de características principales que se han estudiado de manera sistemática, para poder compararlas entre ellas. Estas características se detallan a continuación:

- Aspecto textural a simple vista: Una simple observación de la lámina delgada a contraluz aporta rápidamente una idea clara de la microestructura de la muestra. Se distinguen dos tipologías principales:
 - Textura homogénea.
 - Textura heterogénea.
- Descripción textural de detalle: Nos permite profundizar en la descripción de las texturas principales. Algunos de los parámetros a tener en cuenta son:
 - Arenítica o granular (grano soportada).
 - Grauváquica (matriz soportada o grano soportada).
 - Lutítica (matriz soportada).
 - Bioclástica (bioclasto soportada, matriz soportada).
 - Caótica (predominio arcilloso, predominio granular, porcentaje estimado).
 - Bioturbada (predominio arcilloso, predominio granular, estructura primigenia desaparecida u obliterada, porcentaje de estructura original conservado).
 - Laminada, bandeada, foliada, estratificada.
- Composición predominante de la matriz: En el estudio de las rocas arcillosas, una correcta descripción de la matriz será un factor de gran interés.

Capítulo 5. Metodología

- Carbonatada.
- Cementada (micrítica, esparítica, bioclástica).
- Lutítica.
- Ferruginosa.
- Coloración.
- Orientación.
- Fracción detrítica:
 - Proporción.
 - Composición mineralógica.
 - Distribución y tamaño de grano.
 - Morfología de los granos.
 - Orientación de los granos.
 - Bioclastos.
- Otros aspectos de interés:
 - Presencia de minerales opacos (sulfuros y/o óxidos principalmente)
 - Presencia de yeso.
 - Cantos blandos o arcillosos.
 - Fisuras y diaclasas (continuidad, abertura, orientación, morfología, relleno...).

5.3.2.11 Proctor Modificado

Introducción

El ensayo Proctor modificado tiene por objeto la determinación en el laboratorio de la densidad que servirá como patrón para el control de la densidad en obra, así como de la humedad con que se ha obtenido dicha densidad. A estos valores se les denomina «densidad máxima Proctor Modificado» y «humedad óptima Proctor modificado», respectivamente (Ensayo de Proctor modificado NLT-108/58).

La normativa aplicable para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103 - 501 / 94: Ensayo de Proctor Modificado.

Preparación de la muestra

Se pretende fabricar un número determinado de probetas cilíndricas de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura, cada una de ellas con diferentes humedades, con el fin de obtener la curva de compactación que nos determinará la densidad máxima del material y su correspondiente humedad óptima. En caso de que se tenga información sobre los valores de humedad óptima del material, o de alguno que pueda comportarse de manera similar, se intentará escoger los valores de humedad adecuados para que la curva de compactación quede definida correctamente.

La muestra se prepara machando el material en mortero y haciéndolo pasar por el tamiz de abertura 2 mm, en cantidad suficiente como para fabricar el número de probetas deseado (habitualmente 5 o 6 probetas suelen ser suficientes como para definir la curva). Cuando tenemos

todo el material, tomamos varios cubos de plástico con tapa y en cada uno de ellos introducimos unos 200 gramos del material y lo mezclamos con la cantidad de agua correspondiente a la humedad que queremos que tenga la probeta que vamos a fabricar. La mezcla se remueve con espátula de forma que la humedad quede lo más repartida posible y evitando la formación de aglomeraciones de partículas, ya que éstas suelen contener más humedad que las partículas sueltas. Una vez realizadas las mezclas, se llevan los cubos bien cerrados a la cámara húmeda y se mantienen allí por un periodo de 24 horas para que la mezcla quede lo más homogénea posible en cuanto a su contenido en humedad.

Fabricación de las probetas

Los instrumentos necesarios para la fabricación de las probetas son un molde de diámetro 38 mm y altura 76 mm y un compactador tipo Army con una maza de 2 kg y una altura de caída de 50 cm. En primer lugar se barniza la base del molde y sus paredes interiores (Figura 5.2.82) para facilitar el desmoldado, una vez la probeta está fabricada. A continuación se extrae el cubo de la cámara húmeda y se divide el material de humedad homogénea en 5 partes, a cada una de las cuales se le aplicarán 15 golpes con el compactador tipo *Army* (Figura 5.2.83). Una vez compactadas todas las capas se retira el anillo de enrase y con un cuchillo se elimina el material que queda por encima de la parte superior del molde y se enrasa de forma que el material ocupe todo el volumen del interior del molde (Figura 5.2.84).

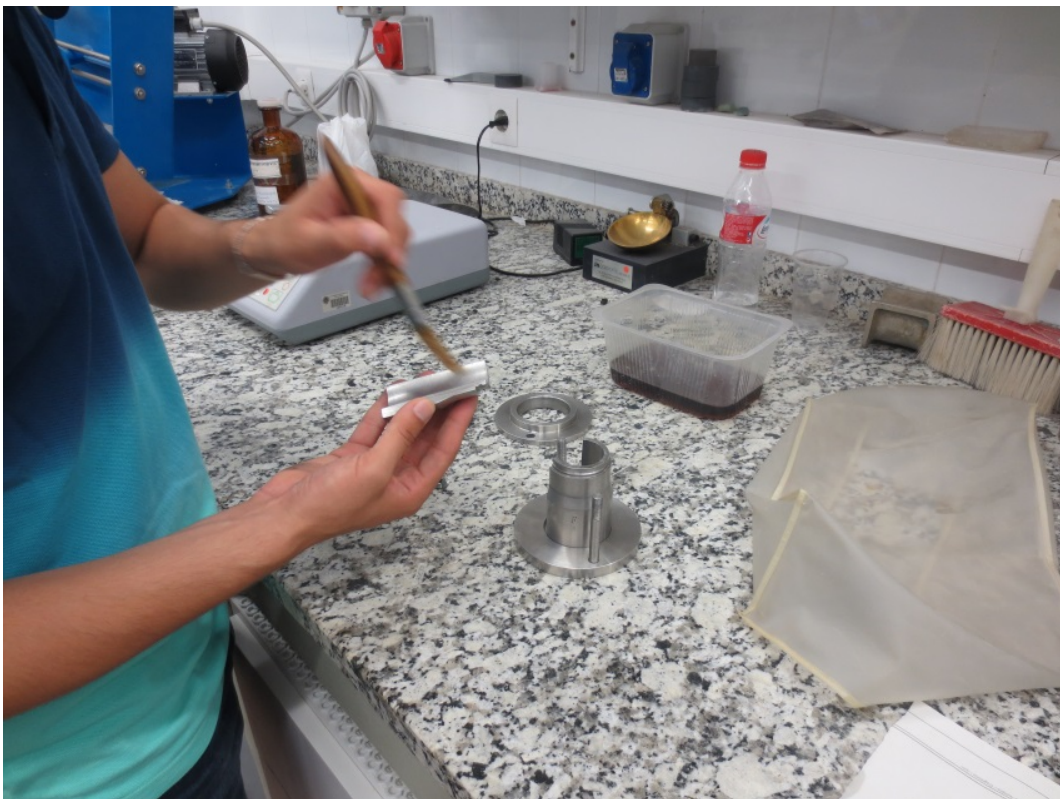


Figura 5.2.82. Barnizado del molde.



Figura 5.2.83. Compactación de las probetas.

Se desmolda la probeta con cuidado, utilizando un martillo de goma procurando en todo momento que la probeta sufra la menor deformación posible. Una vez extraída la probeta se pesa y se mantiene cubierta en la cámara húmeda, de forma que mantenga su humedad inicial mientras se fabrica el resto de probetas.

Secado de las probetas

En este caso, se aprovecharon las probetas de esta forma fabricadas para realizar un ensayo de Compresión Simple. Una vez rota la probeta se introduce en la estufa para poder determinar su humedad.

Resultados

Obtenemos la masa seca de la probeta y, con este dato, podemos obtener su densidad seca dado que conocemos el volumen de la probeta y obtenemos también la humedad real que tiene la probeta. Por cada probeta obtenemos un punto en la curva de compactación (figura 5.2.85). Dentro de la curva de compactación se distinguen 2 ramas: una ascendente, cuyos puntos corresponden a los valores de humedad que están por debajo de la óptima y una descendente cuyos puntos corresponden a los valores de humedad que están por encima de la óptima. Se traza una línea recta sobre cada una de las ramas, de modo que a su punto de intersección le

Capítulo 5. Metodología

corresponde el valor de la humedad óptima. De tal forma, el punto más alto de la curva definirá el valor de la densidad seca máxima del material arcilloso.



Figura 5.2.84. Probeta dentro del molde.

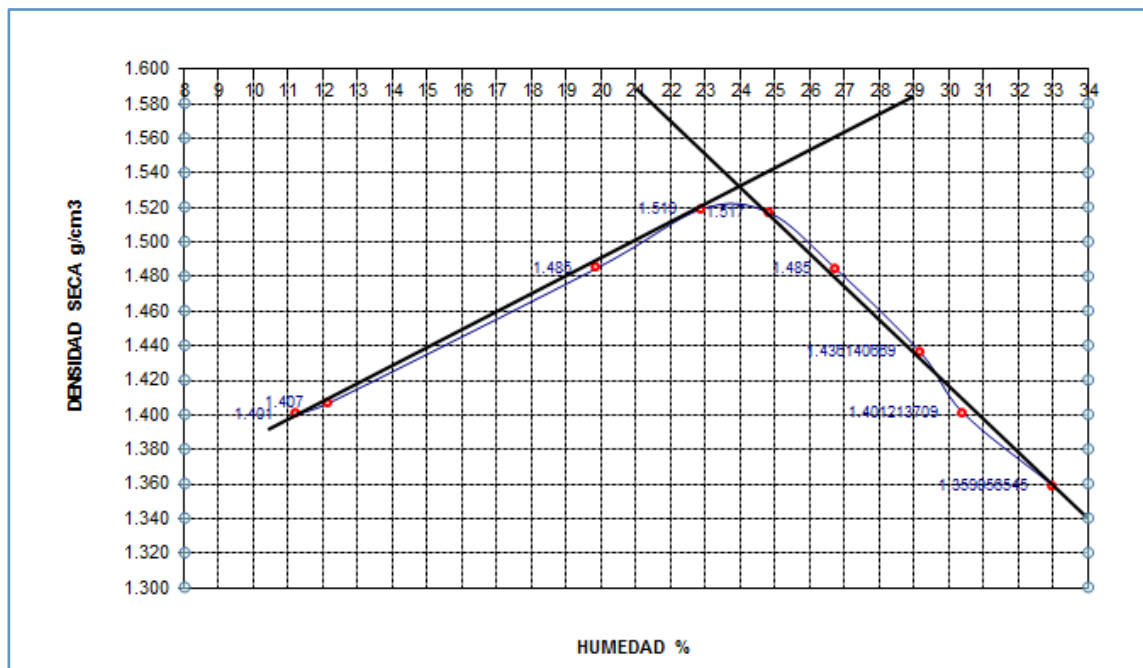


Figura 5.2.85. Curva de compactación.

5.3.2.13 Dispersabilidad

Introducción

El objetivo de este ensayo es obtener una medida directa de la dispersabilidad de suelos arcillosos compactados. Se trata, en líneas generales, de hacer pasar un flujo de agua a través de una muestra compactada, de forma que se crean uno o varios conductos. En algunas arcillas estos conductos se estabilizan pero en otros casos el flujo arrastra las partículas coloidales y estos conductos van haciéndose cada vez más grandes como consecuencia de la erosión.

La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: NLT-207/91: Dispersabilidad por tubificación.

Preparación de la muestra

Se machaca el material, se hace pasar por el tamiz de 2 mm de abertura y se amasa con agua destilada de modo que el material resultante tenga una humedad cercana a la correspondiente al límite plástico o a la humedad óptima del Proctor. Una vez amasada la muestra suficientemente como para que sea una masa homogénea se introduce en la cámara húmeda durante 24 horas. Después de esto, se compacta en 5 capas en una célula cilíndrica de plástico, a razón de 12 golpes por capa con un compactador tipo *Army*, de modo que la probeta tiene unas dimensiones de 33.5 mm de diámetro y 39.5 mm de altura. Se determina la humedad del material sobrante obtenido del enrase de la probeta.

Se perfora longitudinalmente la muestra con una aguja de 1 mm de diámetro y se coloca la muestra en el molde *Sherard*, de modo que el material arcilloso queda delimitado por dos capas de gravilla, tal como se observa en la Figura 5.2.86.

Realización del ensayo

Se conecta el molde *Sherard* en el que está introducida la probeta con el depósito de agua (Figura 5.2.87) y se coloca a una altura de 5 centímetros por encima del eje de la probeta. A su vez, por el otro extremo de la probeta sale un tubo flexible que lleva el agua de salida a una probeta graduada de 1000 c.c. Se abre el depósito y en el instante en que sale la primera gota por el tubo de salida se pone en marcha el cronómetro. Se registran los volúmenes de agua que pasan a través de la muestra a los 2, 4, 5, 6, 8 y 10 minutos y se observa y describe el estado de turbidez del agua. Si pasados los 10 minutos se observa que el agua de salida es turbia, se concluye que la arcilla es típicamente dispersiva y se da por concluido el ensayo. En caso contrario, se repite este proceso colocando el depósito a una altura de 18 centímetros sobre el eje de la probeta, y así sucesivamente con las alturas de 38 y 102 centímetros.



Figura 5.2.86. Aspecto de la probeta introducida en el molde Sherard.



Figura 5.2.87. Conexión de depósito con el molde Sherard.

Resultados del ensayo

Para cada altura de agua se anota el volumen de agua recogido en cada tiempo y se calcula el caudal correspondiente. Además, se indicará el estado de turbidez del agua (muy turbia, turbia, ligeramente turbia, turbidez apenas visible, completamente clara; Figura 5.2.88) y la dispersabilidad de las partículas (muy intenso, bastantes partículas, ligero desprendimiento, apenas apreciable, ninguna partícula).



Figura 5.2.88. Aspecto del agua recogida en la probeta.



Figura 5.2.89. Aspecto de la probeta en el molde Sherar una vez finalizado el ensayo.

5.3.2.21 Ensayo edométrico

Introducción

El objetivo de este ensayo es determinar las características de consolidación de los suelos. Para ello se aplican diferentes presiones verticales en una probeta cilíndrica en la que se permite el drenaje tanto en la cara superior como en la inferior, midiendo los asentamientos que se producen en la probeta.

La normativa consultada para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.405:1994 Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.

Preparación de la muestra

La muestra se preparó por compactación directa en el anillo de confinamiento, con material #pasa 2 mm a la humedad óptima ($w_{opt} = 14.4\%$), compactado en 3 capas a razón de 15 golpes por capa, con una maza de 0.5 kg según la energía especificada en el ensayo Proctor Normal. Es recomendable colocar papel filtro tanto en la cara superior como en la inferior de la probeta.

Realización del ensayo

Una vez la muestra está compactada en el anillo de confinamiento, se procede al montaje de la célula, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se coloca la placa porosa inferior sobre la base de la célula.
- Se introduce el anillo de confinamiento con la muestra en su interior.
- Se coloca la placa porosa superior.
- Se coloca el pistón de cierre.
- Se monta el cuerpo lateral de cierre.

Se procede entonces al montaje de la bancada:

- Se coloca la célula edométrica sobre la bancada (Figura 5.2.90) y se ajusta el contrapeso.
- Fijación del yugo.
- Se coloca el deformímetro a medio recorrido.



Figura 5.2.90. Equipo edométrico.

Se procede entonces al proceso de carga, en el que, para cada escalón de carga se colocarán en el colgadero las pesas correspondientes y se dejará consolidar la muestra por un tiempo de aproximadamente 24 horas, registrando las deformaciones que se producen en la probeta. Las presiones verticales correspondientes a todos los escalones de carga que se realizaron son las siguientes : 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 150 kPa, 300 kPa, 600 kPa y 1000 kPa.

Capítulo 5. Metodología

Las presiones verticales correspondientes a los escalones de descarga son 600 kPa, 300 kPa, 150 kPa y 40 kPa.

Resultados

Las lecturas tomadas durante la realización del ensayo se registran en un parte de trabajo como el el rfejado en la Figura 5.2.91.

LECTURAS Y CÁLCULOS DEL ENSAYO																					
Tensión (kPa)	Lecturas de deformación vertical de la probeta (mm)																Deformación Probeta		Altura Final	Índice de Poros (e) $e = \frac{H_1 - H_2}{H_2}$	
	segundos (")				minutos (')				horas (h)								Cada Escalón	Acumulada (DL)	H ₁ - H ₂ - ΔL (mm)		
	0	10	15	30	1	2	5	10	15	30	1	2	3	5	7	24	48	(mm)			(mm)
0																		0.00	0.00	H ₀ = 20,00	0.680
5																		0.00	0.00	20.00	0.680
10	0,000	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,06	0,06	19.94	0.675	
20	0,000	0,012	0,012	0,012	0,015	0,015	0,016	0,016	0,017	0,018	0,019	0,021	0,021	0,022	0,023	0,028	0,028	0,03	0,09	19.92	0.673
40	0,000	0,030	0,031	0,032	0,035	0,036	0,039	0,042	0,044	0,048	0,054	0,056	0,058	0,061	0,064	0,081	0,081	0,08	0,17	19.83	0.666
80	0,000	0,028	0,074	0,079	0,089	0,094	0,104	0,113	0,118	0,127	0,140	0,150	0,155	0,163	0,166	0,185	0,203	0,20	0,37	19.63	0.649
150	0,000	0,071	0,080	0,087	0,108	0,119	0,140	0,156	0,172	0,191	0,211	0,231	0,243	0,257	0,266	0,295	0,295	0,30	0,66	19.34	0.624
300	0	0,380	0,422	0,507	0,519	0,519	0,519	0,520	0,520	0,530	0,550	0,574	0,586	0,602	0,612	0,651	0,651	0,65	1,32	18.69	0.569
600	0,000	0,384	0,436	0,469	0,522	0,551	0,560	0,616	0,635	0,660	0,687	0,712	0,725	0,741	0,752	0,791	0,792	0,79	2,11	17.89	0.503
1000	0	0,313	0,340	0,357	0,401	0,432	0,475	0,506	0,529	0,560	0,591	0,617	0,634	0,654	0,665	0,711	0,711	0,71	2,82	17.18	0.443
600	0	-0,016	-0,016	-0,016	-0,017	-0,019	-0,019	-0,019	-0,019	-0,020	-0,020	-0,020	-0,021	-0,023	-0,024	-0,023	-0,021	-0,02	2,80	17,20	0,445
300	0,000	-0,022	-0,022	-0,022	-0,026	-0,026	-0,027	-0,028	-0,030	-0,031	-0,033	-0,035	-0,035	-0,037	-0,037	-0,037	-0,037	-0,04	2,76	17,24	0,448
150	0,000	-0,002	-0,020	-0,003	-0,005	-0,008	-0,011	-0,014	-0,015	-0,019	-0,023	-0,029	-0,031	-0,034	-0,036	-0,004	-0,004	0,00	2,76	17,24	0,448
40	0,000	-0,011	-0,036	-0,084	-0,094	-0,107	-0,127	-0,142	-0,153	-0,167	-0,181	-0,194	-0,201	-0,207	-0,211	-0,217	-0,217	-0,22	2,54	17,46	0,467

Figura 5.2.91. Parte de trabajo del ensayo de consolidación.

Como se observa, las primeras filas corresponden a los datos obtenidos en los distintos escalones de carga y las últimas filas corresponden a los resultados registrados para los escalones de descarga.

Cada una de estas filas representadas gráficamente, respecto al tiempo, proporcionan las curvas de consolidación del suelo.

Las últimas columnas se reservan para los cálculos que permitirán obtener la curva edométrica.

Propiedades índice

Se obtienen las siguientes propiedades índice antes y después del ensayo:

Capítulo 5. Metodología

- Humedad: $W = \frac{M_t + M_s + M_w - M_t + M_s}{M_s} \cdot 100$
donde:
 M_t es la masa del anillo
 $M_s + M_w$ es la masa de la probeta
- Saturación: $S_r = \frac{V_w}{V_H} = \frac{G_s \cdot W}{e}$
donde:
 V_w es el volumen de huecos rellenos de agua de la muestra
 V_H es el volumen total de huecos de la muestra
 G_s es el peso específico relativo de las partículas de la muestra
 e es el índice de poros de la muestra
- Densidad aparente: $\rho = \frac{M_s + M_w}{V}$
donde:
 $V = \frac{H \cdot \pi \cdot D^2}{4}$ es el volumen de la muestra
- Densidad seca: $\rho_d = \frac{M_s}{V}$
- Índice de huecos: $e = \frac{V_h}{V_s} = \frac{H_h \cdot A}{H_s \cdot A} = \frac{H_h}{H_s} = \frac{H - H_s}{H_s}$

Curvas de consolidación

En un ensayo edométrico se obtienen tantas curvas de consolidación (asiento-tiempo) como escalones de carga aplicados.

La finalidad que se persigue con la representación de estas curvas es obtener la velocidad con la que un determinado suelo consolida, al someterlo a una tensión constante (Garrido *et al.*, 2012).

A medida que transcurre el tiempo (t) el asiento (L) aumenta, así como el grado de consolidación de la muestra ($U = L_{U\%} / L_{100\%}$). La velocidad de consolidación se cuantifica a partir del coeficiente de consolidación C_v :

$$C_v = T_v \cdot d^2 t$$

donde:

C_v es el Coeficiente de consolidación

d es la longitud de drenaje

t es el tiempo necesario para obtener un grado de consolidación determinado

T_v es el factor tiempo.

Los dos métodos habituales para obtener C_v son el método de Taylor y el método de Casagrande:

- MÉTODO DE TAYLOR (RAÍZ DEL TIEMPO). Se obtiene para una consolidación $U = 90\%$. Las curvas de consolidación se dibujan representando la deformación de la probeta, en milímetros, frente a la raíz del tiempo, en minutos (Figura 5.2.92).

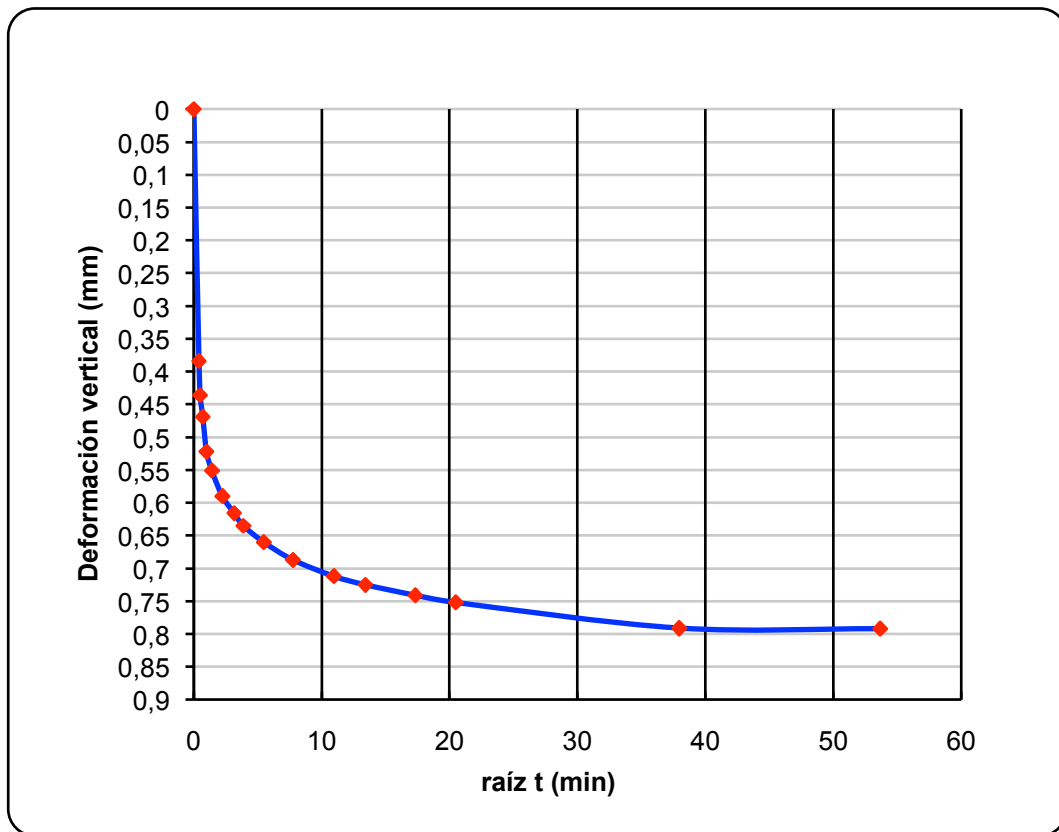


Figura 5.2.92. Curva de consolidación correspondiente al escalón de carga de 600 kPa obtenida con el Método de Taylor.

T_v adopta el valor 0.848 para dicho grado de consolidación, luego:

$$C_v = 0.848 \cdot d \cdot 90 \cdot t \cdot 90$$

- MÉTODO DE CASAGRANDE (LOGARITMO DEL TIEMPO). Se obtiene para una consolidación $U = 50\%$. las curvas de consolidación se dibujan representando la deformación de la probeta en función del logaritmo del tiempo (Figura 5.2.93).

T_v adopta el valor 0.196 para este grado de consolidación, luego:

$$C_v = 0.196 \cdot d \cdot 50 \cdot t \cdot 50$$

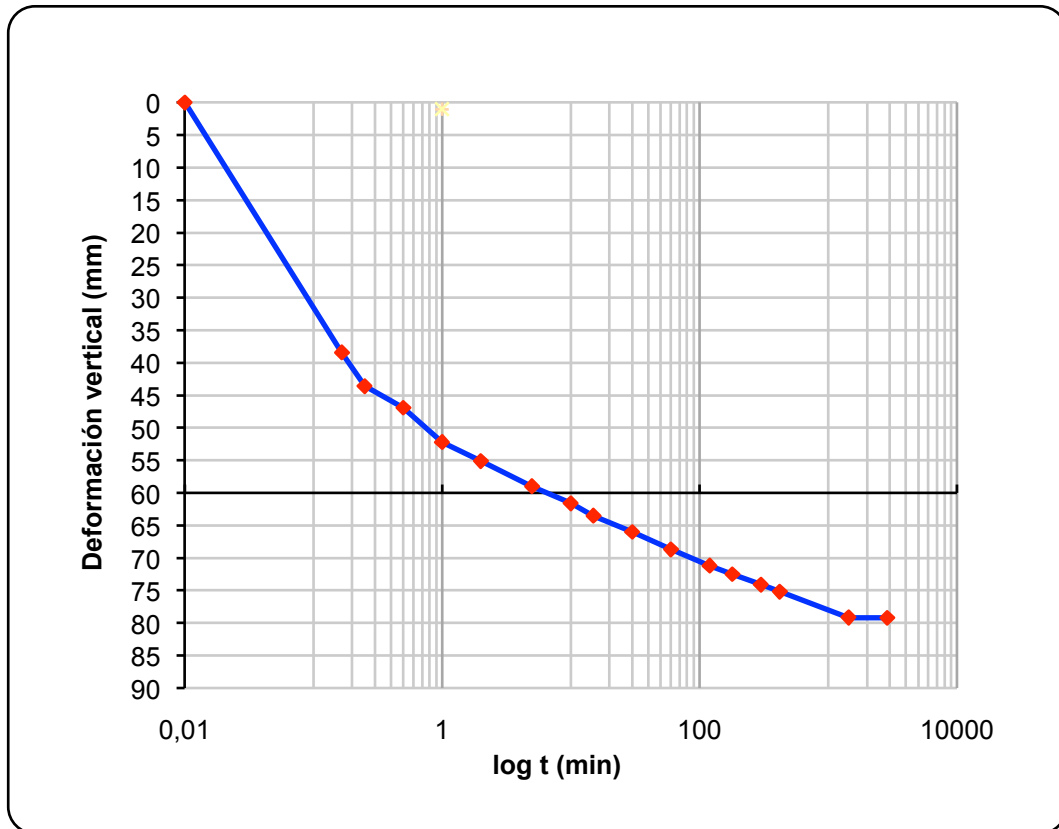


Figura 5.2.93. Curva de consolidación correspondiente al escalón de carga de 600 kPa obtenida con el Método de Casagrande.

Curva edométrica

La curva edométrica obtenida en laboratorio resulta de representar gráficamente el logaritmo de las presiones efectivas, resultantes de la aplicación de los distintos escalones de carga, frente al índice de huecos alcanzado tras la consolidación en cada escalón.

La obtención del índice de huecos se basa en parámetros como la altura de la probeta durante el ensayo y algunas de las propiedades índice descritas anteriormente.

El primer paso consiste en calcular la altura de huecos, como resta de la altura medida en la probeta en un instante t (H_t) y la altura de las partículas sólidas (H_s), constante en todo el ensayo.

$$M_s = V_s \cdot \rho_s \quad V_s = H_s \cdot A \cdot \rho_s = G_s \cdot \rho_w \quad \rightarrow \quad M_s = H_s \cdot A \cdot G_s \cdot \rho_s \quad \rightarrow \quad H_s = \frac{M_s}{A \cdot G_s \cdot \rho_s} \quad H_h = H_t - H_s$$

donde G_s es la densidad relativa de las partículas y se obtiene mediante el ensayo del picnómetro, realizado generalmente con los “restos” de material sobrante del tallado.

El índice de huecos es el cociente entre los volúmenes de huecos (llenos de agua) y el volumen ocupado por las partículas sólidas del suelo. Puesto que el área de la base es constante (las deformaciones laterales están impedidas), esta relación es, en definitiva, la relación entre sus alturas:

$$e_t = \frac{V_h}{V_s} = \frac{H_h \cdot A}{H_s \cdot A} = \frac{H_h}{H_s}$$

Es importante destacar que el índice de huecos se determina al final de cada escalón de carga, la tensión efectiva coincide en ese momento con la tensión total aplicada.

Una vez realizados los cálculos, se obtienen los datos necesarios para la representación de la curva edométrica de laboratorio (Figura 5.2.94).

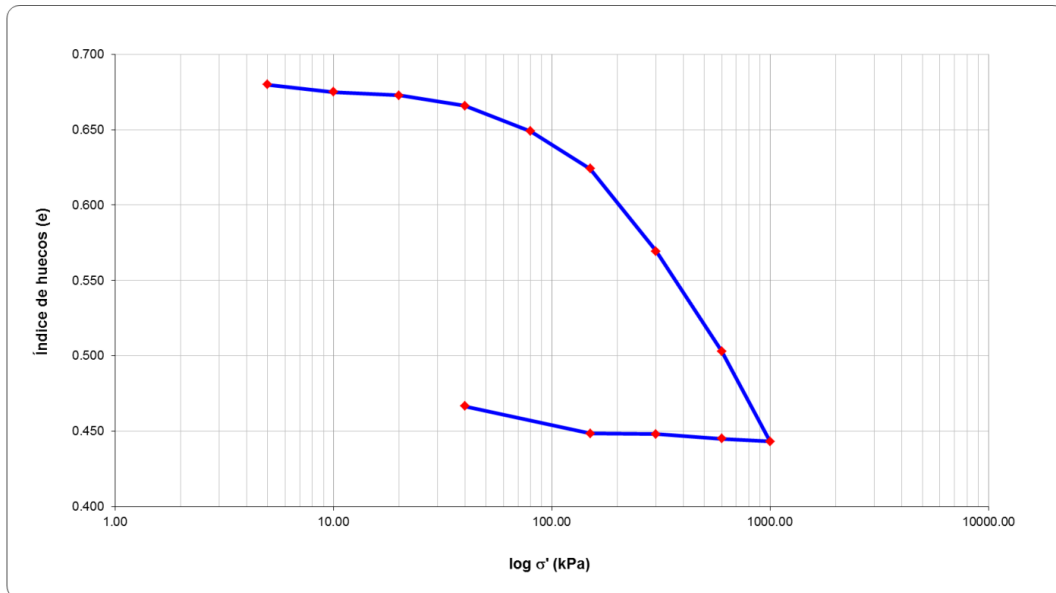


Figura 5.2.94. Curva edométrica de laboratorio.

Las pendientes de cada tramo, definidas como índice de compresión, C_c en la rama de compresión normal e índice de hinchamiento, C_s en la rama de descarga, no son constantes, estarán en función de los puntos que se toman para definirlos.

Con los datos obtenidos se obtienen estos parámetros de deformación y otros como el módulo edométrico según las siguientes expresiones:

$$C_c = e_o - e_1 \log \sigma'_1 \sigma'_o$$

$$C_s = e_o - e_1 \log \sigma'_1 \sigma'_o$$

$$E_m = \sigma'_1 - \sigma'_o e_o - e_1 \cdot 1 + e_o$$

5.3.2.15 Presión de hinchamiento

Introducción

Este ensayo tiene por objeto la determinación de la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro.

Se denomina presión de hinchamiento, a la presión vertical necesaria para mantener sin cambio de volumen, una probeta confinada lateralmente cuando se inunda de agua.

Capítulo 5. Metodología

Este ensayo es aplicable tanto a suelos inalterados como remoldeados; en este estudio se realiza el ensayo utilizando una muestra remoldeada.

La normativa de aplicación a este ensayo es la siguiente: UNE 103 602: 1996 – Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro.

Preparación de la muestra

Es necesario medir la altura del anillo portaprobeta (20 mm) que se utilice, ho, en mm, y el diámetro interior (70 mm), a fin de determinar la sección recta, S , en mm², y el volumen interior del anillo en cm³.

La muestra se preparó por compactación directa en el anillo de confinamiento, con material #pasa 2 mm a la humedad óptima ($w_{opt} = 14.4 \%$), compactado en 3 capas a razón de 15 golpes por capa, con una maza de 0.5 kg según la energía especificada en el ensayo Proctor Normal. Es recomendable colocar papel filtro tanto en la cara superior como en la inferior de la probeta.

Realización del ensayo

El procedimiento operatorio consta de las siguientes partes:

Montaje de la célula

Se coloca la placa poros a inferior sobre la base de la célula, seguidamente el anillo con la probeta, la placa porosa superior y el pistón de carga, de manera que todos estos elementos queden centrados sobre la superficie de la probeta. A continuación se coloca el cuerpo lateral de cierre. Si el anillo es de tipo confinado, se debe acoplar la pieza de engarce entre la base de la célula y aquel.

Cuando se trate de suelos con baja capacidad de absorción, se debe eliminar el agua libre de las placas porosas antes de colocarlas. En suelos con gran capacidad de absorción, dichas placas se deben secar al aire antes de colocarlas en el equipo.

Montaje en la bancada y preparación del ensayo

Se coloca la célula edométrica sobre la bancada, ajustando seguidamente el contrapeso de manera que entren en contacto todos los elementos de transmisión de carga y quede la palanca prácticamente horizontal.

Se aplica una ligera presión de ajuste, no superior a 3 kPa, colocando la pesa adecuada en el colgadero.

Se coloca el medidor de deformación en posición, de manera que el vástago tenga recorrido en ambos sentidos, y se anota su lectura como valor inicial de referencia.

Realización del ensayo propiamente dicho

Se llena de agua el recipiente de la célula. A partir de ese momento se vigila la lectura del medidor de deformaciones, aumentando la carga, para que aquel se mantenga en ± 0.01 mm de la lectura inicial de referencia. Cuando no se aprecie tendencia en la variación de la deformación de la probeta con el tiempo, se considera que se ha alcanzado el equilibrio y se da por finalizado el ensayo. Para saber si se ha alcanzado este equilibrio, es muy útil ir representando en un gráfico los incrementos de presión aplicados respecto al tiempo transcurrido. Se toma como valor de la presión de hinchamiento, p_h , el de la presión que en el momento de alcanzar el equilibrio se está ejerciendo sobre la probeta.

Una vez determinada la presión de hinchamiento, se procede a descargar por escalones hasta una presión de 10 kPa, valor correspondiente a la presión utilizada en la determinación del hinchamiento libre. Aunque se debe esperar en cada escalón hasta alcanzar el equilibrio, a efectos prácticos, se considera que 24 h es un intervalo de tiempo suficiente para ellegar al equilibrio en la mayoría de los casos. Al final de cada escalón de descarga, se anota la lectura del medidor de deformaciones (Figura 5.2.95).

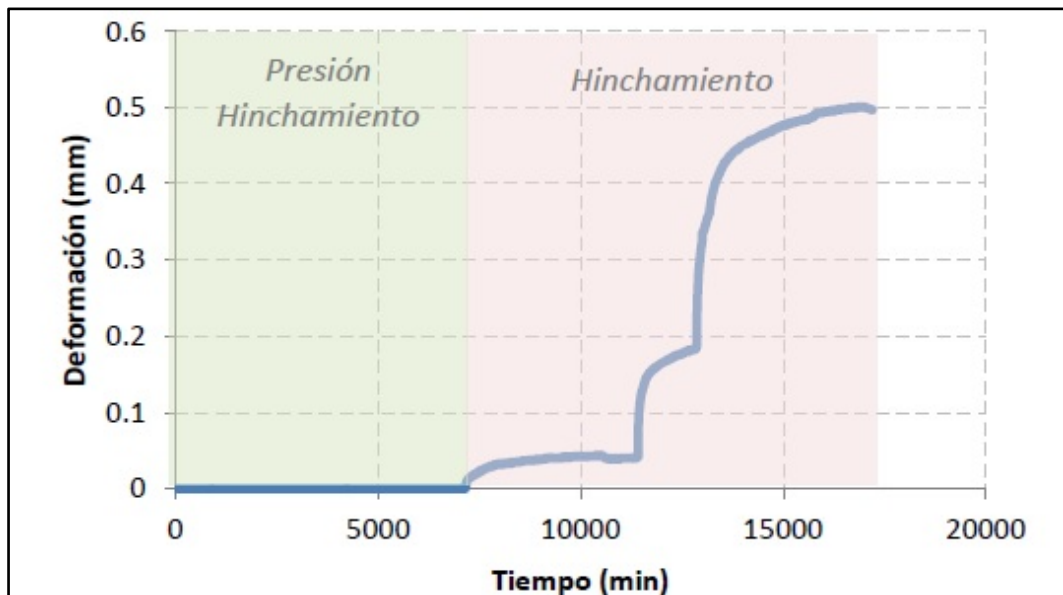


Figura 5.2.95. Gráfico de la deformación de la probeta con el tiempo.

La secuencia de escalones de descarga puede ser $p_h, p_h/2, p_h/4, p_h/8, \dots$, donde p_h es la presión de hinchamiento obtenida anteriormente.

Una vez finalizado este proceso se quitan las pesas que quedan, se retira la célula de la bancada, se vacía el agua de la misma y a continuación se desmonta la célula retirando el anillo con la probeta en su interior. Se eliminan las gotas de agua que quedan en el anillo mediante papel absorbente. Se determina la masa de la probeta después del ensayo, en gramos. Se introduce en estufa para que se deseque, hasta masa constante y se determina la masa de la probeta seca en gramos.

Resultados

Se determinan las humedades inicial y final de la probeta, y se expresan en %.

Se determina la densidad seca inicial de la probeta, dividiendo su masa seca por su volumen, y se expresa en g/cm^3 .

El valor de la presión de hinchamiento p_h , se obtiene dividiendo la carga aplicada en el momento del equilibrio, Q expresada en N , por la sección recta de la probeta, S , en mm^2 , mediante la siguiente expresión:

$$Ph=QS \cdot 103 \quad (kPa)$$

5.3.2.16 Hinchamiento libre

Introducción

Este ensayo tiene por objeto la determinación del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.

Se denomina hinchamiento libre, al incremento de altura, expresado como tanto por ciento del valor inicial, que experimenta una probeta de suelo cuando se encuentra confinada lateralmente, sometida a una presión vertical de 10 kPa y se inunda de agua.

Es aplicable tanto a suelos inalterados como remoldeados; en este estudio se realiza el ensayo utilizando una muestra de suelo remoldeada.

La normativa de aplicación de este ensayo es la siguiente: UNE 103 601: 1996 – Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.

Preparación de la probeta

Es necesario medir la altura del anillo portaprobeta (20 mm) que se utilice, h_o , en mm, y el diámetro interior (70 mm), a fin de determinar la sección recta, S , en mm^2 , y el volumen interior del anillo en cm^3 .

La muestra se preparó por compactación directa en el anillo de confinamiento, con material #pasa 2 mm a la humedad óptima compactado en 3 capas a razón de 15 golpes por capa, con una maza de 0.5 kg según la energía especificada en el ensayo Proctor Normal. Es recomendable colocar papel filtro tanto en la cara superior como en la inferior de la probeta.

Procedimiento operatorio

El procedimiento operatorio consta de las siguientes partes:

Montaje de la célula

Se coloca la placa porosa inferior sobre la base de la célula, seguidamente el anillo con la probeta, la placa porosa superior y el pistón de carga, de manera que todos estos elementos queden centrados sobre la superficie de la probeta. A continuación se coloca el cuerpo lateral de cierre. Si el anillo es de tipo confinado, se debe acoplar la pieza de engarce entre la base de la célula y aquel.

Cuando se trate de suelos con baja capacidad de absorción, se debe eliminar el agua libre de las placas porosas antes de colocarlas. En suelos con gran capacidad de absorción, dichas placas se deben secar al aire antes de colocarlas en el equipo.

Montaje en la bancada y preparación del ensayo

Se coloca la célula edométrica sobre la bancada, ajustando seguidamente el contrapeso de manera que entren en contacto todos los elementos de transmisión de carga y quede la palanca prácticamente horizontal.

Se aplica una ligera presión de ajuste, no superior a 3 kPa, colocando la pesa adecuada en el colgadero.

Se coloca el medidor de deformación en posición, de manera que el vástago tenga recorrido en ambos sentidos, y se anota su lectura como valor inicial de referencia.

Realización del ensayo

Se aplica sobre la probeta una presión vertical de 10 kPa. Después de 5 minutos, se anota la lectura del medidor de deformaciones y se toma esta lectura como valor inicial de referencia.

Se llena de agua el recipiente de la célula y se toman las lecturas del medidor de deformaciones hasta alcanzar el equilibrio. La diferencia entre la última lectura y la inicial es el incremento de altura, Δh , experimentado por la probeta.

Normalmente, en la mayoría de los casos se puede considerar alcanzado el equilibrio en un periodo no superior a 72 h. No obstante, en algunos suelos el proceso de hinchamiento se prolonga durante períodos de tiempo mucho más amplios. En tales circunstancias, la representación gráfica de la evolución del hinchamiento en función del tiempo (Figura 5.2.96) puede servir de ayuda al técnico encargado, para decidir el momento de dar por finalizado el ensayo.

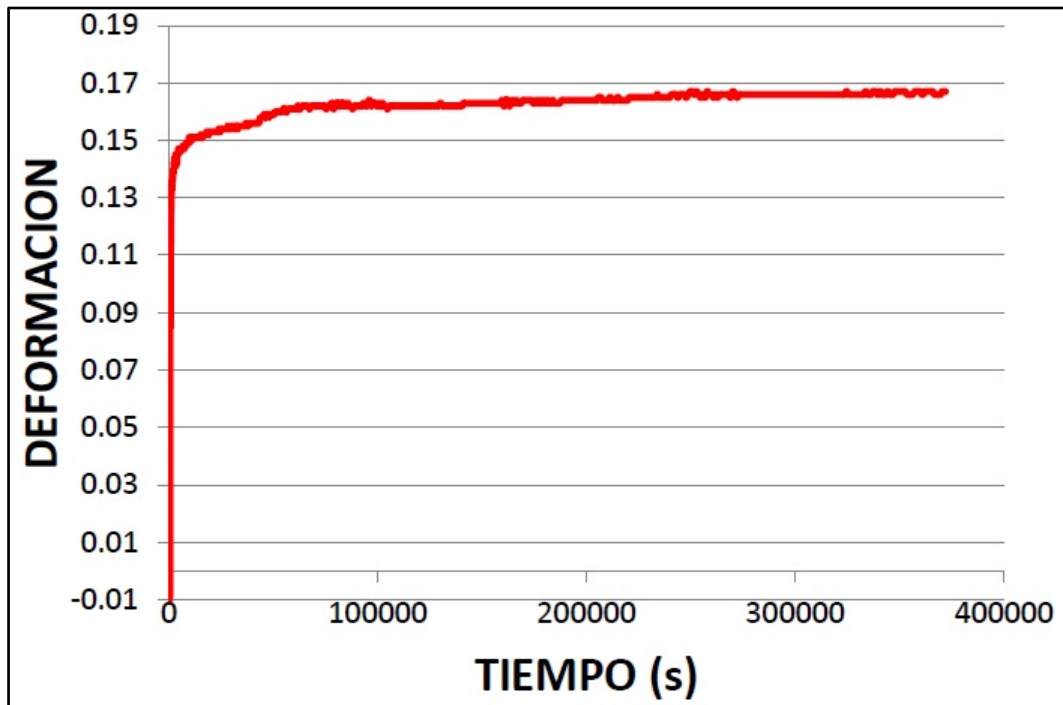


Figura 5.2.96. Gráfica de la evolución de la deformación en función del tiempo.

Una vez finalizado este proceso, se quitan las pesas que quedan, se retira la célula de la bancada, se vacía el agua de la misma y a continuación se desmonta la célula, retirando el anillo con la probeta en su interior. Se eliminan las gotas de agua que quedan en el anillo mediante papel absorbente. Se determina la masa húmeda final de la probeta en gramos y se introduce ésta en estufa para que deseque, hasta masa constante. Se determina la masa de la probeta seca en gramos.

Obtención y expresión de resultados

Se determinan las humedades inicial y final de la probeta, y se expresan en tanto por ciento.

Se determina la densidad seca inicial de la probeta, dividiendo su masa seca por su volumen inicial, y se expresa en g/cm^3 .

El hinchamiento libre se determina, en porcentaje, mediante la expresión:

$$\text{Hinchamiento libre} = \Delta h h_0 \cdot 100$$

donde:

h_0 es la altura inicial de la probeta en mm, que coincide con la del anillo;

Δh es la diferencia entre la lectura final y la inicial del medidor de deformaciones.

5.3.2.17 Compresión Simple

Introducción

En el ensayo de resistencia a compresión simple no se permite la consolidación de la muestra y el esfuerzo de rotura se aplica a una velocidad, lo suficientemente rápida, como para que no se produzca el drenaje en el proceso de rotura (Garrido *et al.*, 2012). La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.400 / 93: Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo.

Preparación de la muestra

Las probetas utilizadas en este ensayo son las empleadas para determinar la curva de compactación en el ensayo Proctor Modificado de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura.

Realización del ensayo

- 1) Se pesa la probeta antes de la rotura.
- 2) Se coloca la probeta en la prensa (figura 5.2.97).



Figura 5.2.97. Probeta en la prensa.

- 3) Se lleva a 0 el indicador de deformación utilizando el *software Mecasoft*.
- 4) Se aplica la carga a una velocidad de 1 mm/min.
- 5) El *software Mecasoft* va registrando los valores de deformación y de carga durante el proceso.
- 6) Cuando la probeta alcanza su rotura (figura 5.2.98) se paran la prensa y el registro de datos. Se debe realizar un esquema de rotura, teniendo en cuenta el ángulo del plano de rotura. La probeta se introduce en la estufa para determinar su humedad.



Figura 5.2.98. Rotura de la probeta.

Resultados

El *software Mecasoft* registra durante todo el proceso los valores de la carga en kilogramos y los valores de la deformación en milímetros. Mediante unos sencillos cálculos podemos obtener la gráfica tensión-deformación (figura 5.2.99), de la que podemos extraer el valor de la resistencia a compresión simple como el máximo valor de tensión que alcanza la probeta y su deformación unitaria en rotura (en porcentaje). No obstante, hay que tener en cuenta que durante el ensayo el área en la que se aplica la carga aumenta a medida que su longitud se acorta. Por lo tanto, se aplica la siguiente corrección al cálculo de la tensión que soporta la probeta en cada instante:

$$\sigma_{cor} = P A_{cor} \quad (1)$$

$$A_{cor} = A_o 1 - \varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = \Delta h / H_o \quad (3)$$

donde:

ε es la deformación longitudinal unitaria de la probeta.

A_o es el área inicial de la probeta.

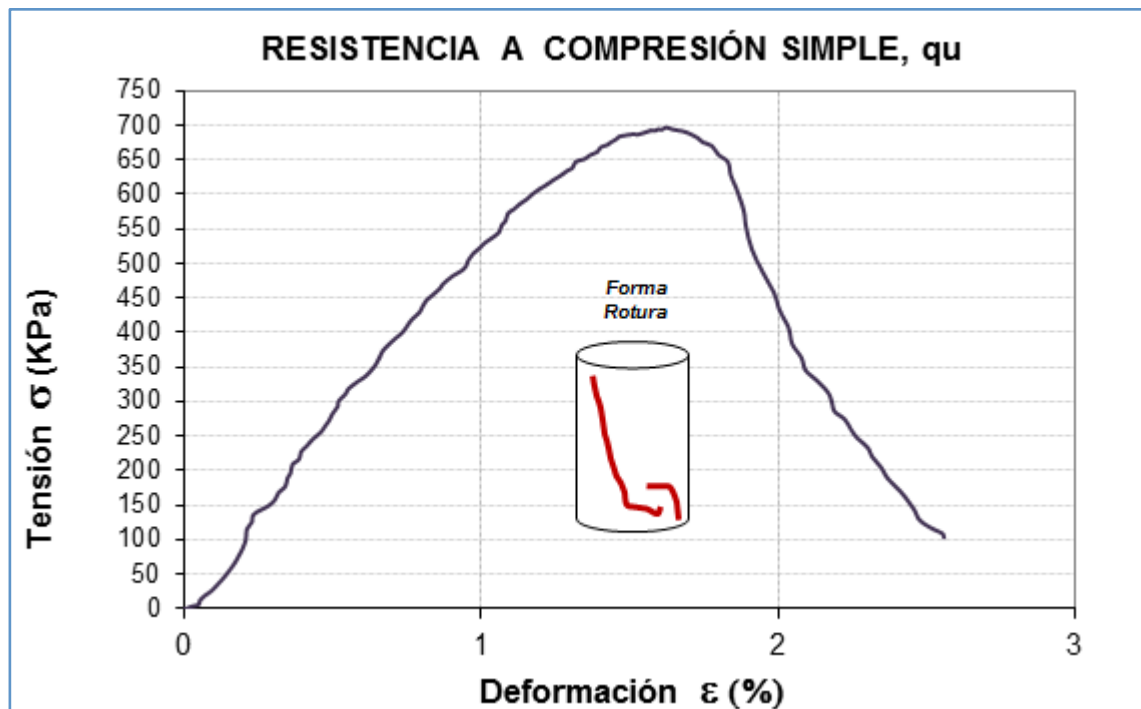


Figura 5.2.99. Gráfica tensión-deformación y esquema de rotura.

5.3.2.18 Corte Directo

Introducción

El objeto de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo remoldeado, mediante la determinación de los parámetros efectivos de resistencia del suelo c' y φ' (cohesión efectiva y ángulo de rozamiento efectivo, respectivamente). La modalidad de ensayo de corte directo que se ha realizado es la CD (Ensayo consolidado y con drenaje) y la forma de realización es la de deformación controlada con una velocidad de deformación aproximada a 0,011 mm/min.

La normativa que rige este ensayo es la siguiente: UNE 103.401 / 98: Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo.

Preparación de la muestra

Se fabrica una probeta con material machacado que pasa por el tamiz de 2 mm de abertura, con las siguientes características:

- Diámetro = 50 mm.
- Altura = 100 mm.
- Humedad óptima.

De esta probeta se tallan discos de una altura algo superior a 25 mm que posteriormente se introducirán en la caja de corte.

Realización del ensayo

1. *Montaje de la caja de corte*

- 1) Se talla con un cuchillo un cilindro de la probeta con una altura superior a 25 mm.
- 2) Se pesa la caja de corte superior (T_c).
- 3) Se introduce el cilindro en la caja de corte superior y se pesa el conjunto ($T_c + S + A_i$).
- 4) Montaje de la caja de corte:
 - 4.1) Introducir la base metálica en la caja de corte inferior.
 - 4.2) Introducir una placa porosa.
 - 4.3) Introducir un papel de filtro.
 - 4.4) Introducir una placa ranurada previamente pesada (T_{pr}) con las ranuras en posición perpendicular al movimiento de la caja de corte.
 - 4.5) Unir caja de corte superior e inferior con tornillos habiendo aplicado vaselina en la superficie de contacto.
 - 4.6) Colocar la otra placa ranurada sobre la muestra y presionar hasta que esta toque el fondo.
 - 4.7) Introducir otro papel de filtro.
 - 4.8) Introducir la otra placa porosa.
 - 4.9) Poner la tapa.
- 5) Introducir la caja en la banqueta.

2. *Fase 1: Saturación:*

- 1) Ajustar la banqueta hasta la línea negra (Figura 5.2.100).
- 2) Introducir caja de corte.
- 3) Nivelar el soporte (Figura 5.2.101).
- 4) Colocar el deformímetro vertical a media altura de forma que tenga suficiente recorrido en ambos sentidos ascendente y descendente.
- 5) Introducir agua en la banqueta (Figura 5.2.102).



Figura 5.2.100. Ajuste de la banqueta.



Figura 5.2.101. Nivelación del soporte.

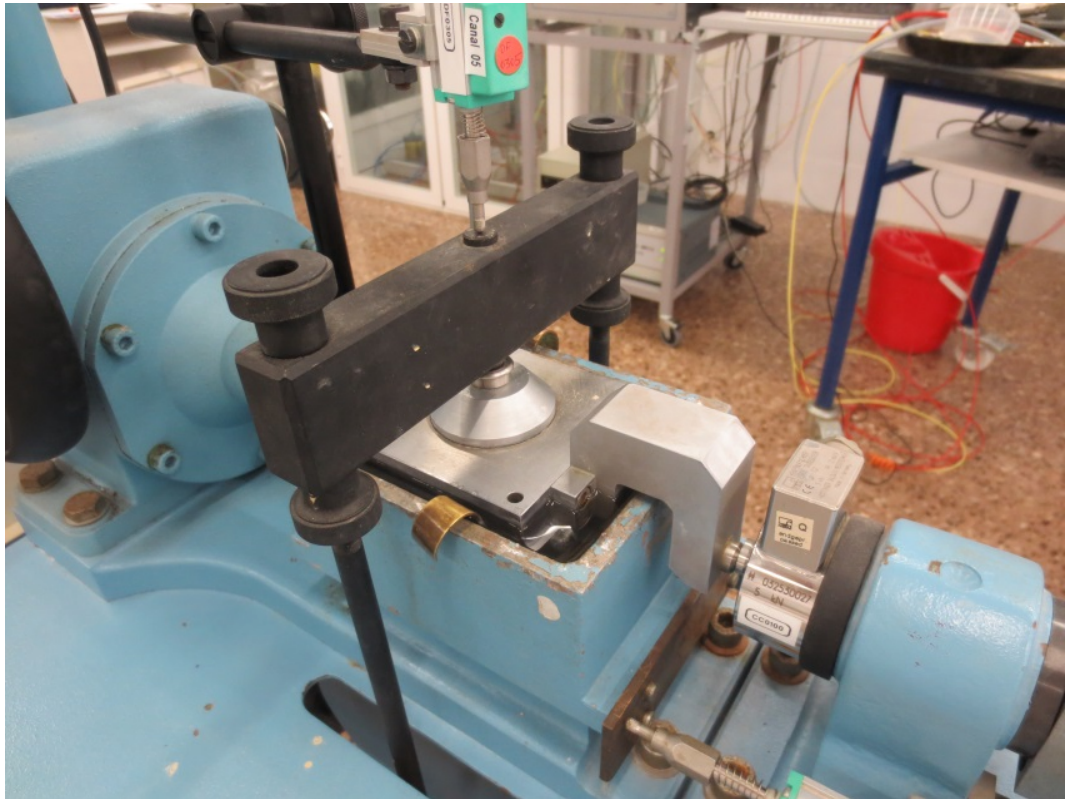


Figura 5.2.102. Colocación del deformímetro y llenado de agua.

- 6) Dejar saturar la muestra durante 24 horas. Si la muestra tiene hinchamiento libre se deben ir colocando pesas ligeras (de 50 o 100 gramos) de forma que la deformación no varíe.
3. Fase 2: Consolidación:
- 1) Comprobar en el *software Mecasoft* el tiempo de adquisición de datos que para esta fase será de raíz del tiempo (Figura 5.2.103).
 - 2) Poner el tornillo situado debajo de la maquinaria en contacto con la palanca, de forma que al aplicar las pesas no la muestra no se deforme sin que dicha deformación sea registrada por el *software*.
 - 3) Colocar las pesas (Figura 5.2.104).
 - 4) Pulsar el botón de Inicio en el software. Aparecerá un menú donde hay un botón "Aceptar". Se pulsa y rápidamente se destornilla el tornillo situado en la parte inferior de la maquinaria de forma que se vaya registrando la consolidación inicial de la muestra. Es conveniente que este paso sea realizado con la ayuda de una persona.
 - 5) La muestra permanecerá consolidándose durante un período mínimo de 24 horas.

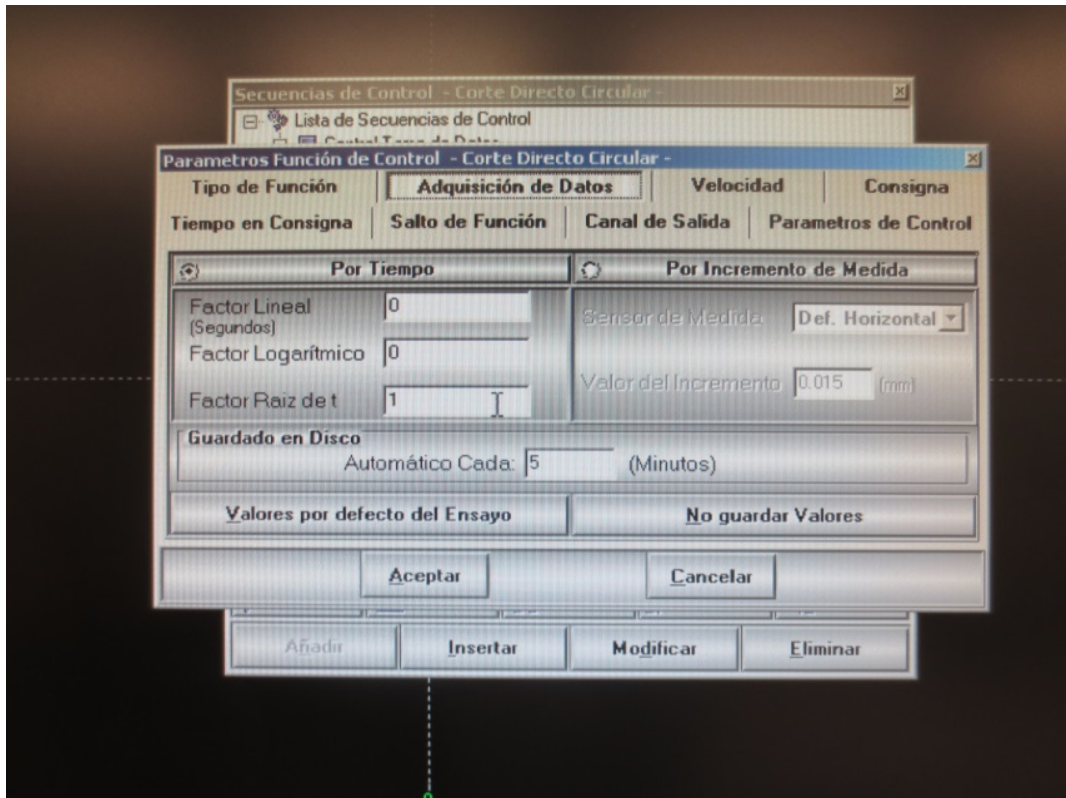


Figura 5.2.103. Elección del tiempo de adquisición de datos.

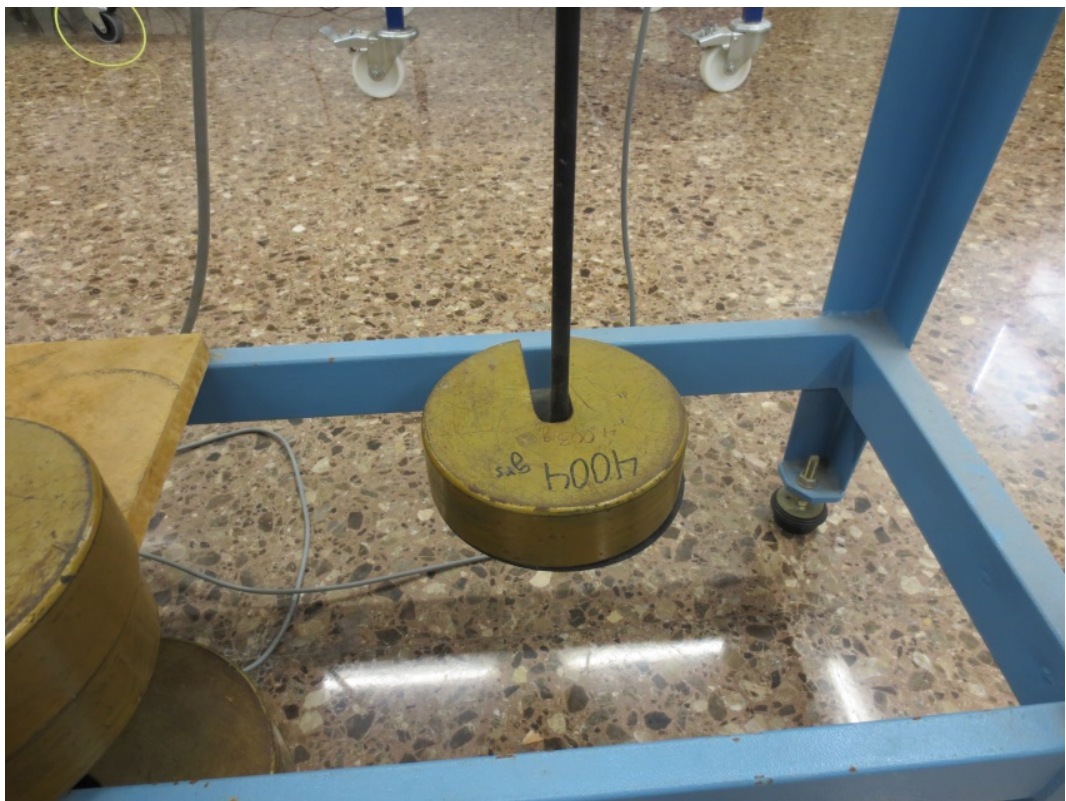


Figura 5.2.104. Colocación de las pesas.

4. Fase 3: Rotura:

- 1) Parada del software Mecasoft y exportar datos a formato análisis.
- 2) Cambiar el tiempo de adquisición de datos a $\Delta t = 30$ segundos.
- 3) Retirar los tornillos de la caja de corte.
- 4) Poner en contacto la célula y la caja de forma manual con el motor, asegurando que funciona el sensor de fuerza (Figura 5.2.105).
- 5) Bloquear motor (Figura 5.2.106).
- 6) Activar el motor (*Power on / Run*) y pulsar el botón Aceptar en el *software*.



Figura 5.2.105. Puesta en contacto célula-caja.

5. Fin del ensayo:

- 1) Seguir la siguiente secuencia en el *software Mecasoft*: Parada > Ensayo > Exportar a formato análisis (Figura 5.2.107).
- 2) Retirar las cargas.
- 3) Quitar el agua (Figura 5.2.108).
- 4) Retirar el deformímetro vertical.
- 5) Extraer la caja de corte de la banqueta.
- 6) Extraer las muestras con las placas ranuradas de la caja, pesarlas y secar en estufa hasta peso constante (Figura 5.2.109).

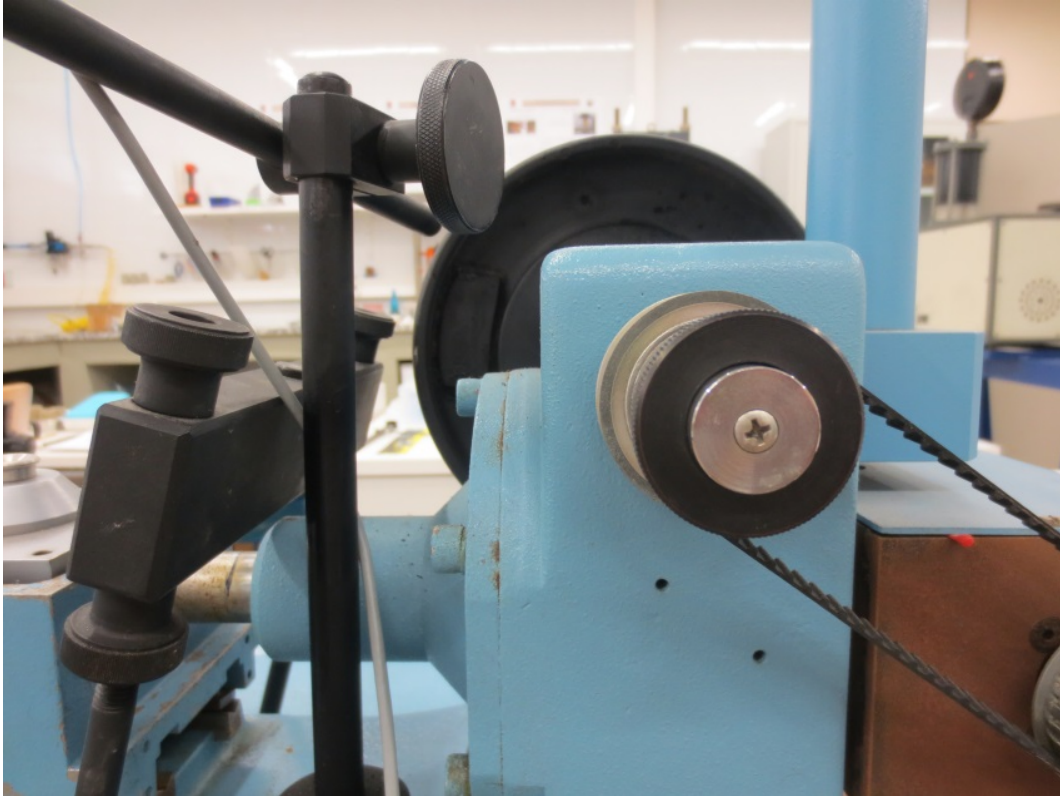


Figura 5.2.106. Bloqueo del motor.

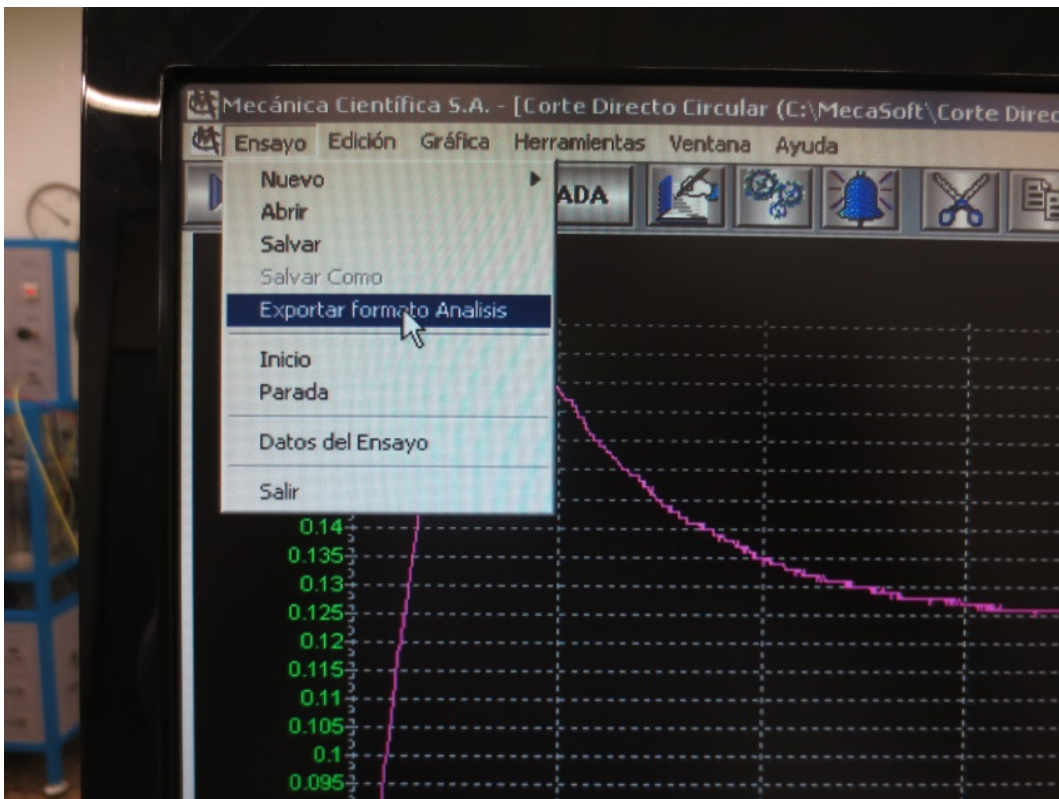


Figura 5.2.107. Guardado del registro de datos.

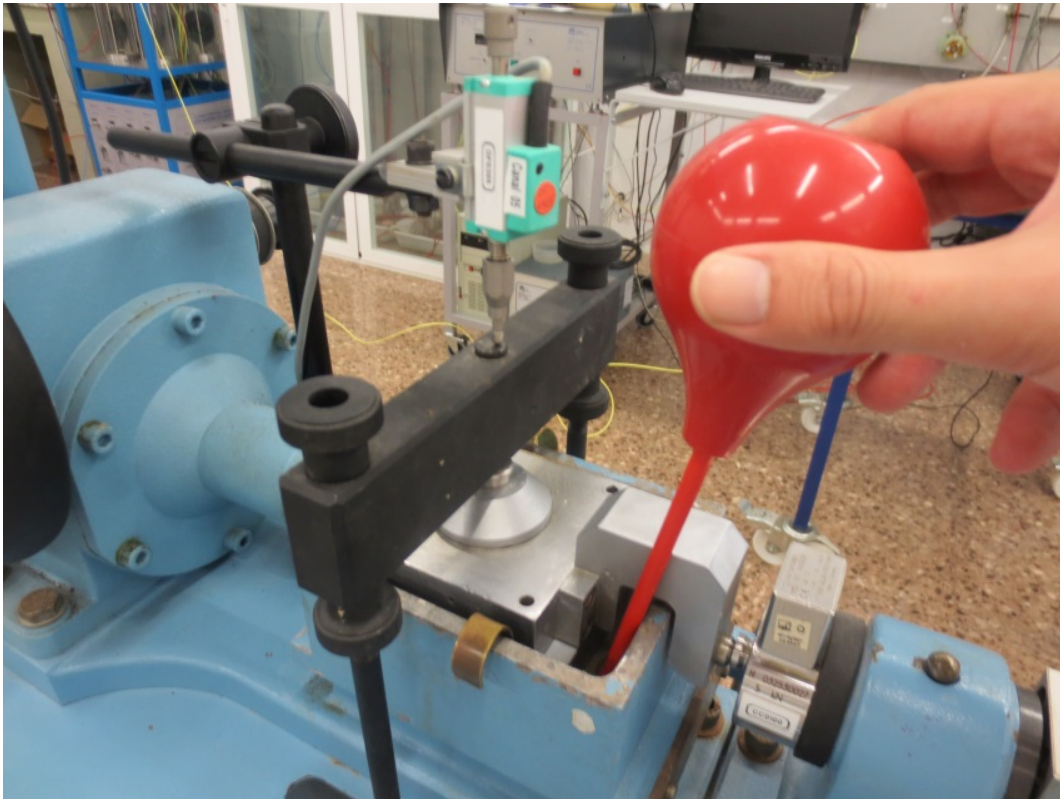


Figura 5.2.108. Vaciado de la caja de corte.



Figura 5.2.109. Muestra y placas ranuradas tras el secado en estufa.

Resultados

El procedimiento operativo aplicado anteriormente se repite con varios escalones de carga. En este ensayo hemos realizado tres correspondientes a una carga vertical de 100 kPa, 200 kPa y 300 kPa, añadiendo a cada una de estas cargas una pequeña proporción correspondiente a la presión de hinchamiento de la muestra.

Se representa el gráfico desplazamiento – tensión tangencial (Figura 5.2.110) a partir de los datos registrados durante el proceso de rotura de la muestra.

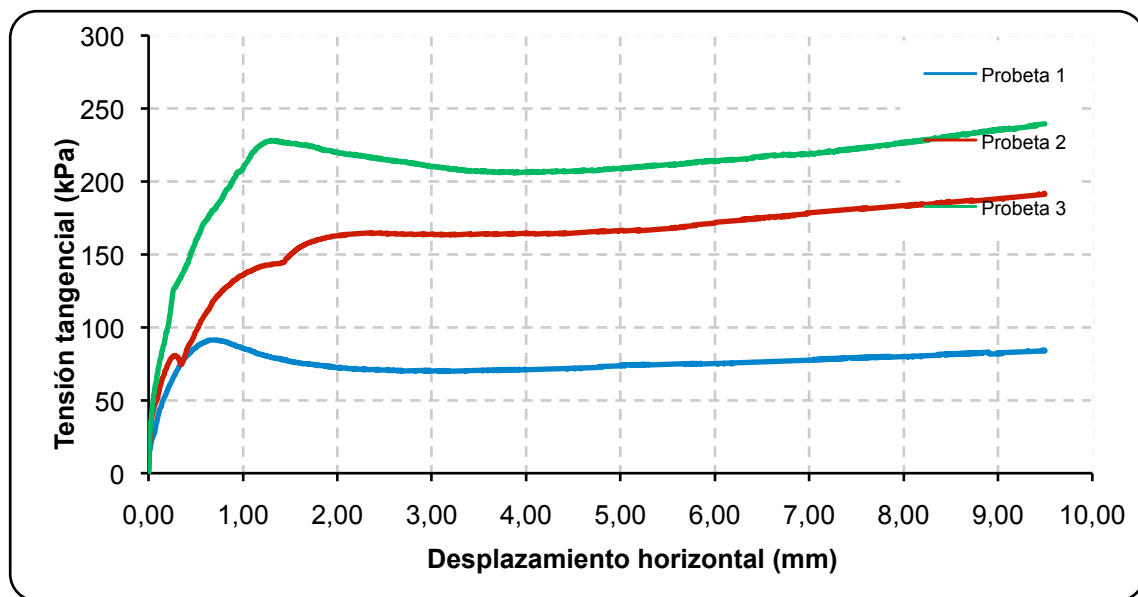


Figura 5.2.110. Gráfico desplazamiento - tensión tangencial.

Para obtener los parámetros resistentes efectivos (c' y φ') tomamos dos criterios distintos de rotura. El primero de ellos es el de tensión tangencial máxima y el segundo de ellos es el de largas deformaciones. Con estos criterios obtenemos el gráfico tensión normal – tensión tangencial máxima (Figura 5.2.111).

La relación lineal entre estas dos variables se obtiene trazando la línea que mejor ajuste a estos tres puntos.

La ordenada en el origen de esta recta será la cohesión del suelo y la pendiente el ángulo de rozamiento (Garrido *et al.*, 2012).

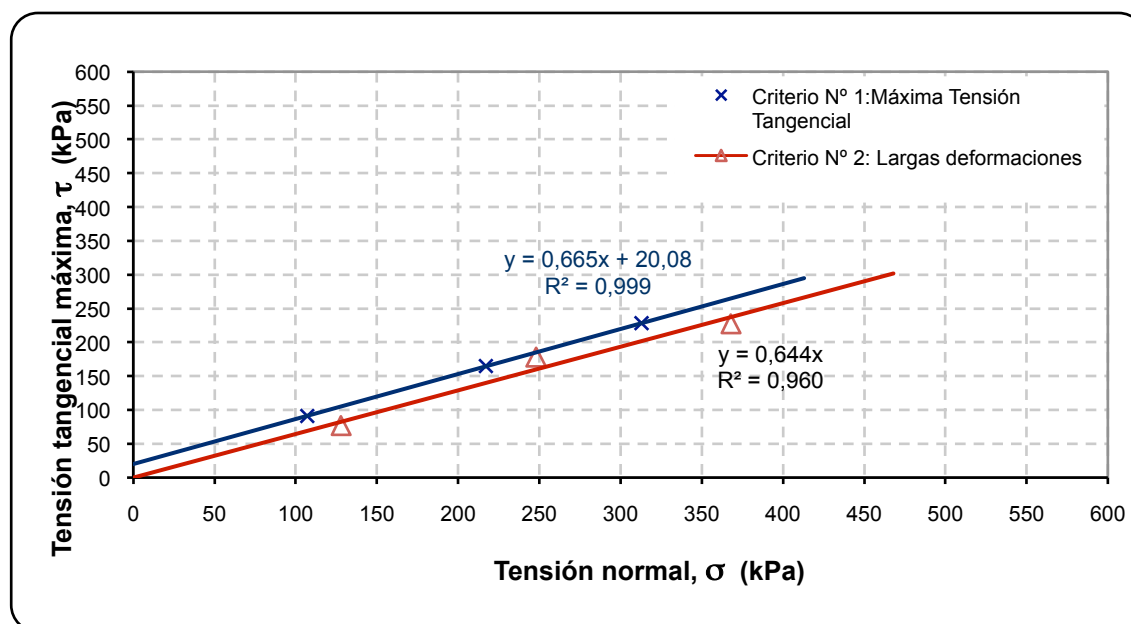


Figura 5.2.111. Gráfico tensión normal - tensión tangencial máxima.

5.3.2.19 Slake Durability Test

Introducción

El objetivo de este ensayo es determinar la susceptibilidad de las rocas blandas arcillosas a los agentes atmosféricos y, en concreto, a los ciclos de humedad-sequedad, que puede tener como consecuencia el desmoronamiento de las mismas. Las variantes que se han realizado en este ensayo son las siguientes para las muestras DIT14-201 Y DIT14-601, procedentes de Alcoy y de Montaberner, respectivamente:

- 1) Muestra inicialmente a humedad higroscópica y agua destilada.
- 2) Muestra inicialmente a humedad higroscópica y agua de la zona.
- 3) Muestra inicialmente seca y agua destilada.
- 4) Muestra inicialmente seca y agua de la zona.

Para las muestras DIT14-1001 procedente de Benissa, no se ha considerado la variable de la humedad al inicio del ensayo y todas las muestras han pasado por un ciclo de secado previo al primer ciclo del Slake, tal como especifica la normativa aplicable.

Debido a que el material Tap encontrado en la zona de la variante de Benissa es muy heterogéneo, se ha preferido prescindir de esta variable y se han considerado dos tipos de muestras, la primera de ellas formada por fragmentos de caliza margosa (Figura 5.2.112) con un gran porcentaje de carbonato, y la segunda de ellas formada por fragmentos de margas calcáreas muy poco meteorizadas (Figura 5.2.113), con el fin de estudiar los posibles problemas de erosión diferencial que se pueden originar en ese tipo de terreno.

De forma que las variantes para la realización del ensayo en esta muestra son las siguientes:

- 1) Muestra formada por fragmentos de caliza margosa y agua destilada.

Capítulo 5. Metodología

- 2) Muestra formada por fragmentos de caliza margosa y agua procedente de la zona.
- 3) Muestra formada por fragmentos de marga calcárea y agua destilada.
- 4) Muestra formada por fragmentos de marga calcárea y agua procedente de la zona.

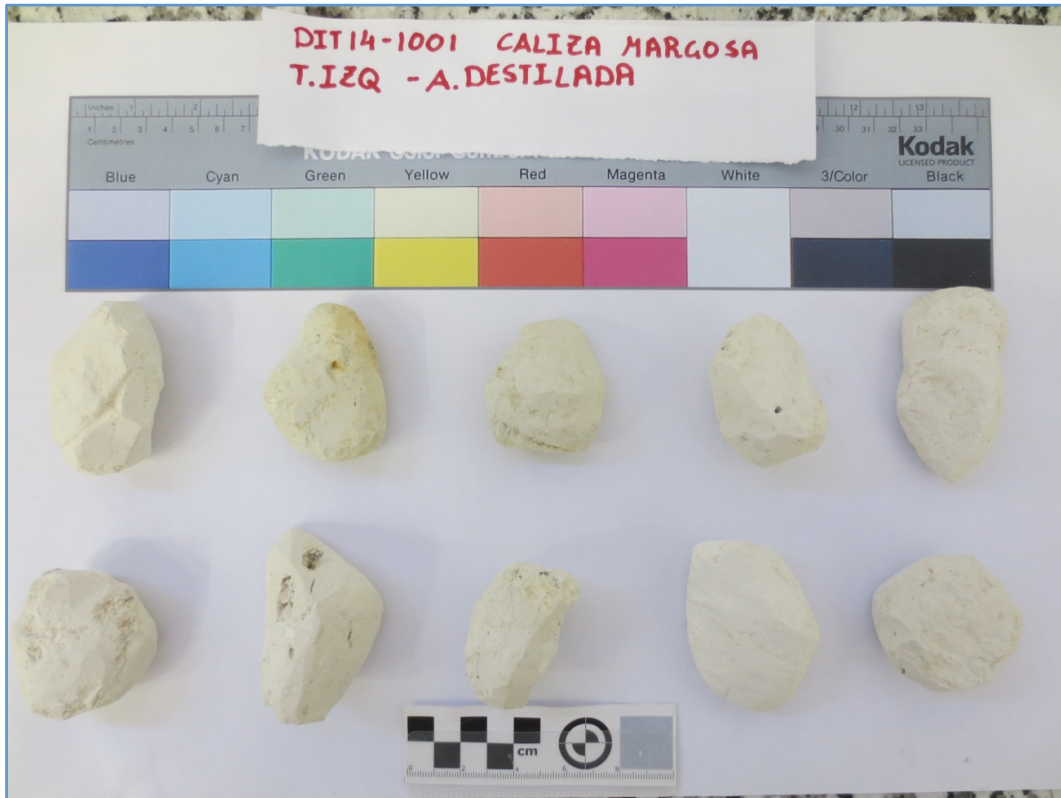


Figura 5.2.112. Fragmentos de caliza margosa.

La normativa para la realización de este ensayo es la siguiente: NLT 251 / 91: Determinación de la durabilidad de las rocas blandas al desmoronamiento.

Descripción del equipo de ensayo

El equipo de ensayo (Figura 5.2.114) consta de dos tambores cilíndricos cuya superficie lateral es una malla cilíndrica normalizada con una abertura de 2 mm, cada uno de los cuales se introduce en una cubeta que se rellena del agua correspondiente hasta una altura de 20 mm por debajo del eje del tambor. El conjunto se une a un motor que hace girar los cilindros a una velocidad de 20 ± 1 r.p.m, durante 10 minutos.



Figura 5.2.113. Fragmentos de marga calcárea poco meteorizada.



Figura 5.2.114. Equipo de ensayo

Preparación de la muestra

Se trata de preparar dos grupos de 10 fragmentos cada uno, de forma que el peso de cada uno de los fragmentos esté comprendido entre 40 y 60 gramos y el peso total de cada uno de los grupos debe estar comprendido entre 450 y 550 gramos. Para ello, se toman fragmentos más o menos grandes del material llegado a laboratorio y se tallan las piedras con un cuchillo (Figura 5.2.115) o con un martillo, en el caso de que el material arcilloso no sea lo suficientemente blando (Figura 5.2.116).



Figura 5.2.115. Preparación de la muestra.

Durante el tallado de los fragmentos se intentará, siempre que sea posible, eliminar las esquinas o puntas afiladas, de modo que presenten una forma lo más esférica posible, para evitar que el desmoronamiento en el tambor se produzca por choque o por abrasión entre ellas.

Cuando se ha obtenido una cantidad considerable de fragmentos (entre 30 y 40 fragmentos) que cumplan los requisitos de peso, se escogen aquellos que presenten un aspecto más esférico y se hacen dos grupos de 10 fragmentos cada uno, que cumplan también las especificaciones de peso (entre 450 y 550 gramos).



Figura 5.2.116. Preparación de la muestra con el uso de un martillo.



Figura 5.2.117. Formación de los grupos de fragmentos.

Capítulo 5. Metodología

Se intentará en la medida de lo posible, que los pesos de cada grupo sean similares y que no existan grandes diferencias entre las formas de los fragmentos de un grupo y de otro (Figura 5.2.117) para que éstos no sean factores influyentes en los resultados y sea posible obtener conclusiones sobre el efecto que tiene la composición química del agua en el desmoronamiento de estas rocas blandas arcillosas.

Una vez formados los grupos se les toma una fotografía (Figura 5.2.118). Se toma el peso de los tambores con la tapa abierta, se introducen los fragmentos en él y se pesa de nuevo el conjunto, también con la tapa abierta. En la realización del ensayo con las variantes 1 y 2 especificadas en la introducción de este apartado, el siguiente paso es proceder a realizar el primer ciclo del *Slake Durability Test*. Si se toman en cuenta las variantes 3 y 4, previamente al primer ciclo, se llevará la muestra a estufa para que pierda toda su humedad.



Figura 5.2.118. Muestra para el ensayo del *Slake*.

Realización del ensayo

Se introducen los tambores, con los fragmentos de rocas blandas en su interior, dentro de las cubetas y éstas se rellenan de agua hasta 20 mm por debajo del eje del tambor. Posteriormente se solidariza el conjunto tambor-cubeta con el motor y se pone en marcha (Figura 5.2.119) durante 10 minutos. Pasado este periodo de tiempo se separa el conjunto tambor-cubeta del motor y se extraen con cuidado los tambores y se introducen en la estufa hasta alcanzar un peso constante. Un tiempo aproximado de 8 horas a una temperatura de 105 °C es suficiente para

eliminar toda el agua de la muestra. A continuación se extraen los tambores, se pesan y se toma una fotografía de los fragmentos tras el primer ciclo de humedad-sequedad (Figura 5.2.120).

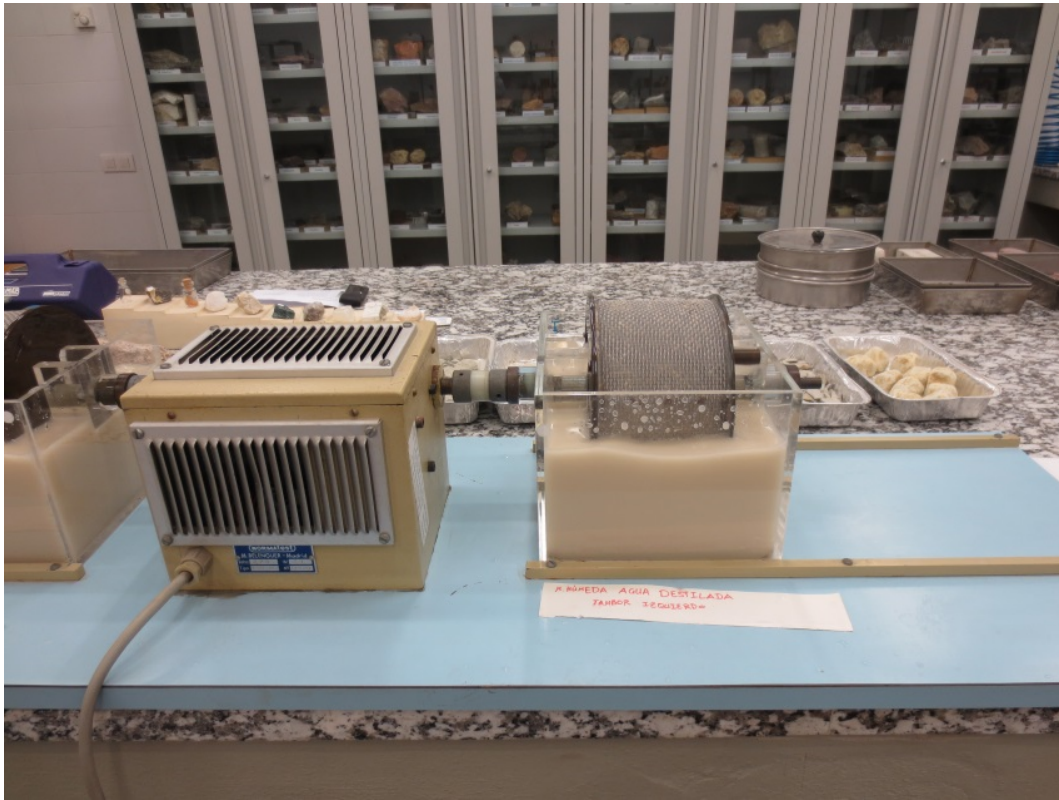


Figura 5.2.119. Ensayo Slake en marcha.

Se pueden aplicar tantos ciclos como se quieran. En este ensayo se han realizado 6 ciclos de humedad-sequedad.

Resultados

El índice Sehudes, I_{d2} , es la relación del peso final al peso inicial de la muestra, después del segundo ciclo y expresada en porcentaje:

$$I_{d2} = \frac{C_2 - DA - D}{A} \cdot 100$$

donde:

C_2 es el peso del conjunto tambor-muestra retenida, tras 2 ciclos de humedad sequedad.

D es el peso del tambor.

A es el peso del tambor con la muestra inicial.

Capítulo 5. Metodología

Si se conocen los límites de Atterberg de la muestra, es posible aplicar la clasificación de Gamble (1971) que clasifica el valor del índice Sehudes de Muy Bajo a Muy Alto en función del valor de éste y del índice de plasticidad, tal como se observa en la Figura 5.2.121.



Figura 5.2.120. Fragmentos de roca blanda tras el primer ciclo del Slake.

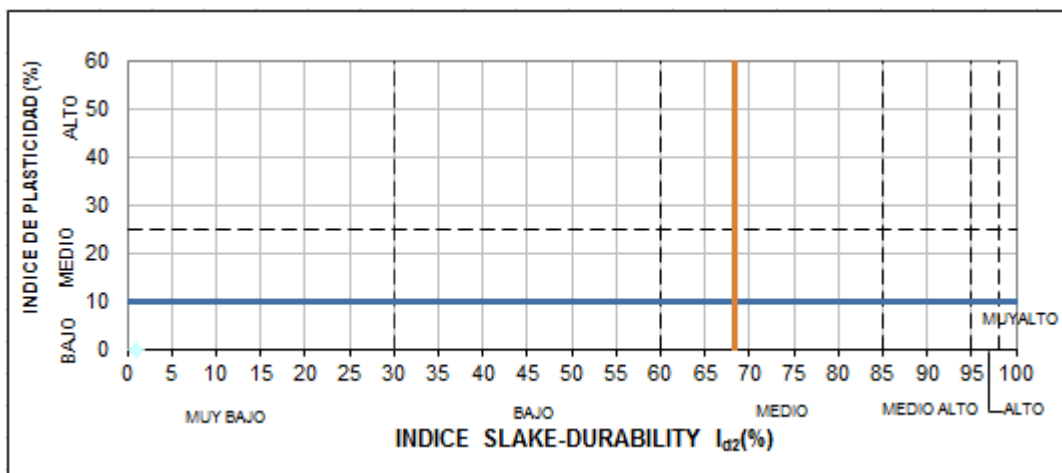


Figura 5.2.121. Clasificación Durabilidad - Plasticidad recomendada por Gamble (1971).

Otro dato, que puede ser interesante es el de la granulometría de los materiales depositados (Figura 5.2.122).

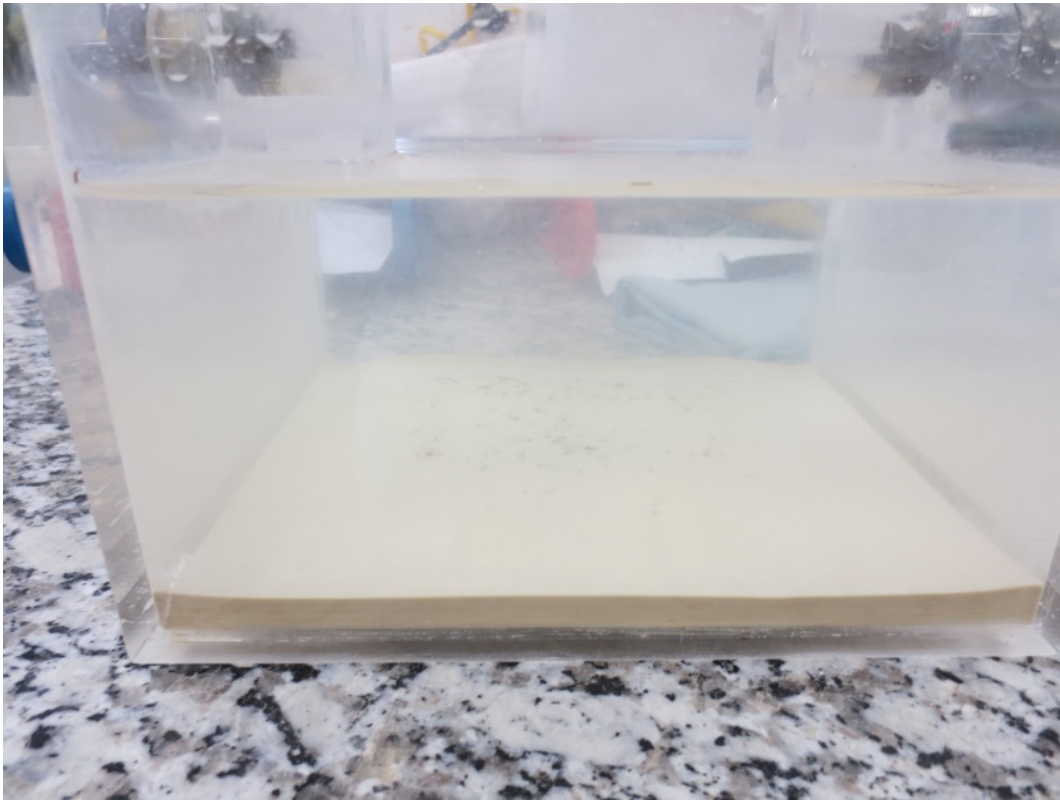


Figura 5.2.122. Materiales depositados.



Figura 5.2.123. Ensayo de granulometría por tamizado.

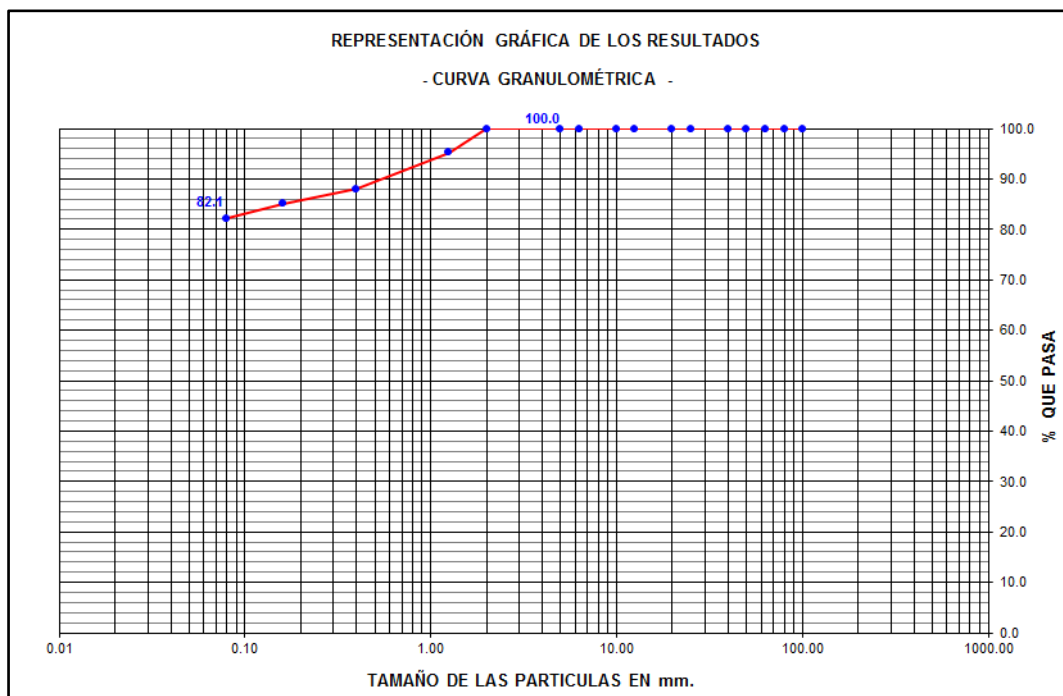


Figura 5.2.124. Granulometría de los materiales depositados en la cubeta.



Figura 5.2.125. Distribución por tamaño de los materiales depositados en la cubeta.

Tras un tratamiento previo de lavado de finos en el que se hace pasar el material depositado por el tamiz nº 200 (abertura de 0,08 mm), se seca la muestra y se realiza el ensayo UNE 103-101-95 Análisis Granulométrico de suelos por tamizado construyendo una pila con los tamices nº 16 (1,25 mm), 40 (0,40 mm), 80 (0,16 mm) y 200 (0,08 mm) y utilizando una máquina agitadora tal como se observa en la Figura 5.2.123.

A partir de este ensayo, obtenemos la curva granulométrica de los materiales depositados en la cubeta (Figura 5.2.124) que se puede acompañar de una fotografía de los mismos, distribuidos por tamaño (Figura 5.2.125).

5.3.2.20 Humedad de las muestras

Introducción

Se define la humedad (W) como el cociente entre la masa de la fase líquida y la de la fase sólida:

$$W = M_w / M_s$$

Existen muchos métodos para la determinación de esta propiedad, no obstante el procedimiento normalizado en Mecánica del Suelo es el Método de secado en estufa, Norma UNE 103.300/93. Se determinaron varias humedades de las muestra al llegar al laboratorio:

- Humedad natural: la humedad del suelo o roca en el terreno. Para su correcta obtención se extrajo muestra del talud a poca profundidad y se introdujo en bolsas pequeñas perfectamente selladas.
- Humedad higroscópica de los fragmentos de roca preparados para la realización del SDT: una vez tallados los fragmentos del *Slake*, es posible determinar su humedad higroscópica (la humedad que absorbe la muestra en condiciones ambientales en el laboratorio) comparando su peso en condiciones ambientales con su peso tras el secado en estufa.

Preparación de la muestra

Se utilizará una muestra representativa en función del tamaño máximo de partícula, tal y como se muestra en la Tabla 5.2.5.

$T_{\text{máx}}$ (mm)	Masa mínima (g)	$T_{\text{máx}}$ (mm)	Masa mínima (g)
0.40	30	50.0	3000
5.0	300	80.0	5000
12.5	900	100.0	7000
25.0	1500		

Tabla 5.2.5. Muestra mínima representativa para ensayo de humedad. Tomado de Garrido *et al.*, 2012.

Procedimiento de ensayo

1. Pesarse la tara (M_T).
2. Pesarse la tara + muestra húmeda (M_{T+S+A}), véase Figura 5.2.126.



Figura 5.2.126. Pesado de la muestra húmeda.



Figura 5.2.127. Estufa.

Capítulo 5. Metodología

3. Introducir el recipiente con la muestra en el interior de la estufa (Figura 5.2.127), a una temperatura entre 105 y 110 °C. Se realizan mediciones periódicas de la masa hasta que sea constante.
4. Finalmente, se pesa la masa de la muestra seca en estufa, una vez enfriada ($MT+S$).

Precisión de las pesadas

La precisión de las pesadas se hace en función del tamaño de la muestra, tal y como se muestra en la Tabla 5.2.6.

Tamaño de la muestra	Precisión
≤ 100 g	0.01 g
100 – 1000 g	0.1 g
> 1000 g	1 g

Tabla 5.2.6. Precisión de las pesadas para los ensayos de humedad. Tomado de Garrido *et al.*, 2012.

Resultados

$$W = \frac{MT+S+A - MT+S}{MT+S} \cdot 100$$

El resultado se presenta con una cifra decimal.

Se repite el proceso con tres muestras distintas del mismo suelo. El valor de humedad natural (o higroscópica en su caso) será la media de las tres determinaciones siempre y cuando no exista dispersión entre los resultados obtenidos.

5.3.2.21 Densidad de un suelo

Introducción

En función del contenido de agua que rellene los huecos del suelo, la densidad específica puede ser:

- Densidad aparente de un suelo (ρ): es el cociente entre la masa de la muestra, con su humedad natural, y el volumen total que ocupa.

$$\rho = \frac{M_t}{V_t}$$

- Densidad seca de un suelo (ρ_d): es el cociente entre la masa de la muestra totalmente seca y el volumen que ocupa.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$$

Capítulo 5. Metodología

- Densidad saturada de un suelo (ρ_{sat}): es el cociente entre la masa de la muestra, con todos sus huecos llenos de agua, y el volumen total que ocupa.

$$\rho = \frac{M_{t,sat}}{V_t}$$

- Densidad sumergida de un suelo (ρ'): es la diferencia entre la densidad saturada y la densidad del agua de dicho volumen desalojado.

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$$

En este caso aplicaremos una variante al procedimiento establecido en la norma UNE 103.301/94: Determinación de la densidad de un suelo. Método de la Balanza Hidrostática.

Este procedimiento únicamente es posible aplicarlo a suelos con cohesión. El ensayo de suelos granulares se debe realizar in situ, con muestra que mantienen inalterada su estructura original, mediante ensayos como el “Método de la arena” o el “Método de isótopos radiactivos” (Garrido *et al.*, 2012).

Preparación de la muestra

Se tomaron tres fragmentos de roca de masas comprendidas entre 280 y 610 g (Figura 5.2.128).



Figura 5.2.128. Fragmentos de roca para la determinación de la densidad aparente.

Procedimiento de ensayo

Se determina su masa en la balanza con precisión 0.1 g, obteniéndose así su masa inicial (M_i), que corresponde a la masa de suelo que contienen los fragmentos a humedad higroscópica.

Se saturan los fragmentos de roca, manteniéndolos sumergidos en agua (Figura 5.2.129) durante un par de días. Se pesan obteniéndose la masa saturada (M_{ss}).



Figura 5.2.129. Fragmentos de roca sumergidos en agua.

Se determina la masa sumergida (M_{sum}) y el volumen de la submuestra (V) mediante el método de la Balanza Hidrostática (Figura 5.2.130), fundamentado en el principio de Arquímedes (Garrido *et al.*, 2012), mediante la siguiente expresión:

$$V = M_{ss} - M_{sum} \rho_w$$

A continuación la muestra se introduce en la estufa durante un mínimo de 24 horas a una temperatura de entre 105 y 110 °C.



Figura 5.2.130. Balanza hidrostática.

Resultados

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

- Densidad Aparente: $\rho = M_i V$, en kg/m^3 con una cifra decimal.
- Densidad Seca: $\rho_d = M_s \alpha V$, en kg/m^3 con una cifra decimal.
- Densidad Saturada: $\rho_{sat} = M_{sat} V$, en kg/m^3 con una cifra decimal.
- Densidad Sumergida: $\rho_{sum} = M_{sum} V$, en kg/m^3 con una cifra decimal.

5.3.2.22 Peso específico de las partículas

Introducción

El objeto de este ensayo es la determinación de la densidad relativa de las partículas menores de 5 mm de un suelo.

La densidad relativa de las partículas (G_s) es el cociente entre la densidad de las partículas sólidas y la densidad del agua a 20 °C de temperatura:

$$G_s = \rho_s \rho_w$$

Capítulo 5. Metodología

A su vez la densidad de las partículas del suelo (ρ_s) se define como el cociente entre la masa de la fase sólida de la muestra y el volumen que ésta ocupa:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

La norma consultada para la realización de este ensayo es la siguiente: UNE 103.102/94: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.

Preparación de la muestra

Se hacen pasar mediante machaqueo en mortero, aproximadamente 50 gramos de la muestra por el tamiz de abertura 5 mm y se secan a 110 °C hasta que adquieren un peso constante. Se vuelve a machacar hasta que todo pasa por el tamiz de abertura 400 μm . De esta masa de material, se obtienen 3 porciones de aproximadamente 15 gramos cada una.

Realización del ensayo

Se prepara el baño termostático a una temperatura de entre 20 y 25 °C y para cada una de las porciones de aproximadamente 15 gramos, obtenidas anteriormente, se sigue el siguiente procedimiento:

Se referencia el picnómetro y se llena de agua destilada hasta por encima de la línea de enrase y se expulsan las burbujas de aire ocluido que haya en el interior. Se introduce en el baño termostático y se mantiene durante una hora. Se enrasa dentro del baño, se extrae y se seca. Se pesa el picnómetro en una balanza de precisión de 0.001 g, de modo que obtenemos el valor M_1 (masa del picnómetro lleno de agua hasta el enrase y con cuello).

Se retira el cuello y se vacía aproximadamente hasta la mitad. Se seca con ayuda de un paño o papel de filtro y pesa, obteniéndose así el valor M_2 (masa del picnómetro sin cuello lleno de agua hasta la mitad), tal como se observa en la Figura 5.2.131.

Se introducen los 15 gramos de muestra y se pesa de nuevo, obteniéndose el valor M_3 (masa del picnómetro, sin cuello y lleno de agua hasta la mitad más la muestra), tal como se observa en la Figura 5.2.132.



Figura 5.2.131. Determinación de la masa del picnómetro sin cuello lleno de agua hasta la mitad.



Figura 5.2.132. Determinación de la masa del picnómetro, sin cuello y lleno de agua hasta la mitad más la muestra.

Se coloca el cuello y se eliminan las burbujas de aire ocluido hirviendo el picnómetro durante 15 minutos (Figura 5.2.133). Se rellena con agua destilada hasta el enrase, se coloca en el baño termostático de nuevo durante una hora y se enrasa dentro del baño. Se retira, se seca y se pesa en la balanza de precisión 0.001 gramos (Figura 5.2.134), de forma que obtenemos la masa M_4 (masa del picnómetro más la muestra y lleno de agua hasta el enrase).





Figura 5.2.135. Aspecto de los picnómetros al finalizar el ensayo.

Resultados

Con los 4 valores obtenidos (M_1 , M_2 , M_3 y M_4) obtenemos la densidad relativa de las partículas del suelo mediante la siguiente expresión:

$$G = \frac{M_3 - M_2}{M_3 - M_2 + (M_1 - M_4)}$$

Dado que este ensayo se realiza por triplicado, se adoptará como densidad relativa de las partículas la media aritmética de los resultados obtenidos con las tres porciones ensayadas.

Temperatura en °C	Coefficientes K_1	Densidad agua en g/cm ³
20	1.0000	0.9982343
21	0.9998	0.9980233
22	0.9996	0.9978019
23	0.9993	0.9975702
24	0.9991	0.9973286
25	0.9988	0.9970770

Tabla 5.2.7. Valores de K_1 , a diferentes temperaturas.

La densidad relativa de un suelo, G , se refiere a la densidad del agua a 20 °C. Por tanto, si la temperatura del agua con la que se realiza este ensayo difiere de este valor, será necesario

multiplicar el valor de la densidad relativa anteriormente obtenido por un coeficiente de corrección K_1 , el cual se obtiene de la Tabla 5.2.7.

5.3.2.23 Ensayo triaxial

Introducción

El ensayo triaxial consiste básicamente en aplicar a una muestra un esfuerzo axial ($\sigma_v = \sigma_1$) y una presión lateral ($\sigma_c = \sigma_3$) que transmiten al suelo un esfuerzo cortante hasta alcanzar la rotura.

Con el ensayo triaxial se pueden obtener los siguientes parámetros:

- Parámetros de Resistencia: cohesión y ángulo de rozamiento.
- Parámetros No Resistentes: permeabilidad, coeficiente de consolidación C_v , coeficiente de empuje pasivo K_0 , etc.
- Trayectoria de Tensiones, en totales y/o efectivas

Parámetros que se deben controlar

- Presión de Célula (σ_c): es la presión que se suministra al interior de la célula, y es de tipo hidrostática.
- Desplazamiento Vertical o Axial: el acortamiento de la probeta en la fase de rotura se mide con la ayuda de un micrómetro o transductor electrónico colocado externamente a la célula.

Parámetros que se deben medir

- Tensión Vertical (σ_v): que se transmite, a velocidad constante, a la probeta a través del pistón de la prensa.
- Presión Intersticial (u): es la presión que tiene el agua en el interior de la probeta, se mide con ayuda de un transductor de presión que está conectado en la parte inferior de la probeta.
- Deformación volumétrica: en cada una de las fases del ensayo se debe medir el cambio de volumen de la probeta, conectando en serie los conductos de presión de cola a un equipo medidor de cambio de volumen.

La normativa que sirve de aplicación a este ensayo es la siguiente: UNE 103.402 / 98: Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial.

Descripción del ensayo

El ensayo triaxial consta de tres fases:

Capítulo 5. Metodología

- Primera fase (Saturación): mediante la aplicación de presión de cola.
- Segunda fase (Aplicación de estado de tensiones isostática): se aplica al agua una presión denominada presión de cámara o presión de célula, que a su vez el agua transmite a la muestra. Si el ensayo es consolidado se debe mantener esta fase, al menos, 24 h antes de comenzar la siguiente.
- Tercera fase (Aplicación de estado de tensiones desviador): hasta alcanzar la presión de rotura de la muestra ensayada. Este estado de tensiones se provoca mediante el aumento de la presión axial empleando un pistón.

Estas tres fases se repiten con tres probetas distintas del mismo suelo, en las mismas condiciones y ensayadas con un nivel de presión de célula distinto en cada caso.

Según la forma de ejecución, se pueden dar las modalidades reflejadas en la Tabla 5.2.8.

MODALIDAD	1ª FASE	2ª FASE	Denominación
UU	Sin consolidación (Unconsolidated)	Sin drenaje (Undrained)	Ensayo rápido
CU	Consolidado (Consolidated)	Sin drenaje (Undrained)	--
CD	Consolidado (Consolidated)	Drenado (Drained)	Ensayo lento

Tabla 5.2.8. Modalidades del ensayo triaxial. Tomado de Garrido *et al.*, 2012.

La modalidad de ensayo que hemos realizado es la CU, consolidado y sin drenaje.

Equipo y material necesario

- Célula triaxial (Figura 5.2.136): consta de una base con un pedestal donde se aloja la muestra para realizar los procesos de saturación, consolidación y rotura. Las características que se le exige son estanqueidad y resistencia.
- Membrana Elástica de Látex: recubre la muestra e impide que el agua de la célula penetre en la probeta.
- Placas Porosas: permite el drenaje de la probeta durante el ensayo (Figura 5.2.137).
- Sistema de aplicación de presiones: para aplicar y mantener la presión de célula y de cola deben ser sistemas independientes y estar provisto de un medidor de presión. Se dispone de un sistema de auto compensación de Botes de Mercurio y un sistema de Controladores Digitales de Presión.
- Prensa: para aplicar el esfuerzo vertical a la probeta debe tener una amplia gama de velocidades de carga en mm/min y un medidor de cargas.
- Medidor de Cambio de Volumen: mediante una doble bureta graduada o un medidor de cambio de volumen de membrana con transductor de desplazamiento; se intercala entre el sistema de presión de cola y la célula.
- Medidor de Presión Intersticial: mediante transductores de presión con bloque desaireador con salida de purga de aire.

- Medidor de Deformación vertical: se determina midiendo el avance del pistón de carga utilizando un micrómetro o un transductor electrónico.



Figura 5.2.136. Célula triaxial.

Preparación de la muestra

Las probetas a utilizar en el ensayo triaxial son de forma cilíndrica con una esbeltez entre 1.85 y 2.25. La probeta de nuestro ensayo tiene unas dimensiones de 3.80 cm de diámetro y 7.62 cm de altura, dando una esbeltez próxima a 2, dentro del intervalo especificado.

Hay que comprobar que el tamaño máximo de las partículas del suelo a ensayar sea menor que 1/5 del diámetro de la probeta. La fabricación de la probeta se ha realizado mediante remoldeo de fracción de suelo que pasa por el tamiz de 2 mm de abertura, por tanto se cumple sobradamente esta condición.

Una vez preparada la probeta se toman las medidas geométricas en mm (precisión 0.1 mm) y su masa en gramos (precisión 0.01 g). A continuación se reviste con una membrana de látex como la que aparece en la Figura 5.2.138 y tapones de PVC.

La colocación de la membrana se realiza con un succionador constituido por un tubo rígido de sección y volumen ligeramente superior a la de la probeta, provisto de un agujero en la sección central para conectar el equipo de succión.

Una vez preparada la muestra se introduce en la célula triaxial donde se realizará el ensayo propiamente dicho.

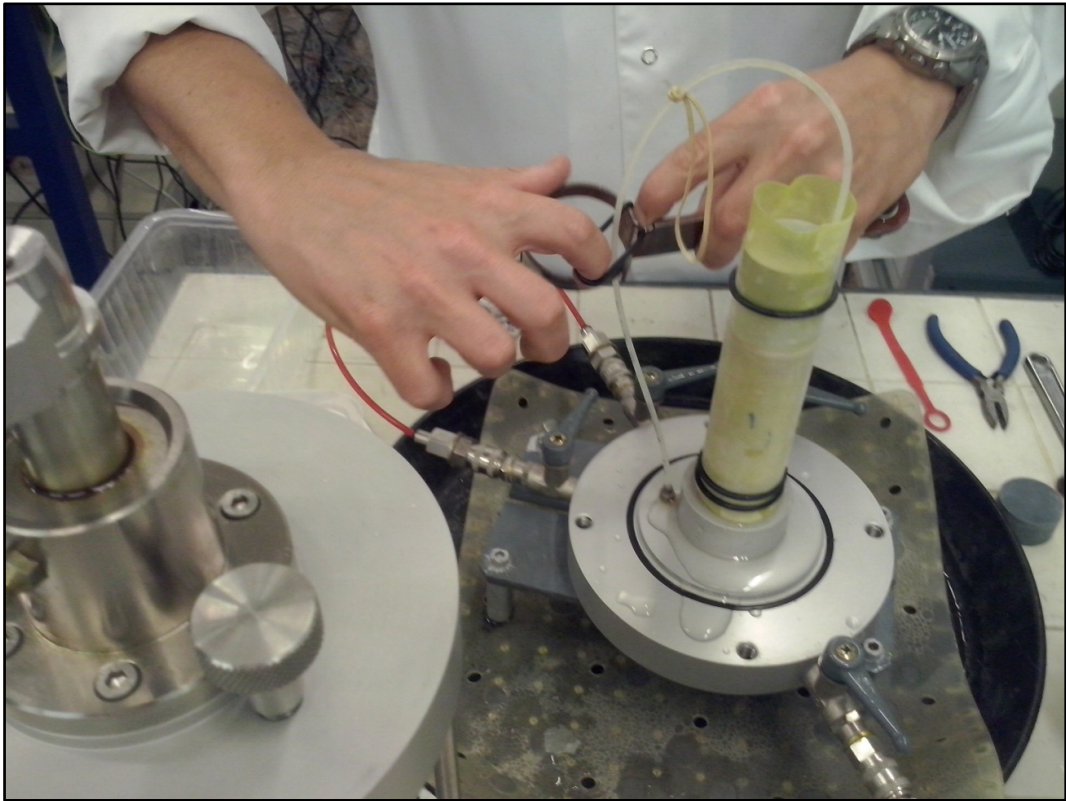


Figura 5.2.137. Montaje de la célula triaxial.

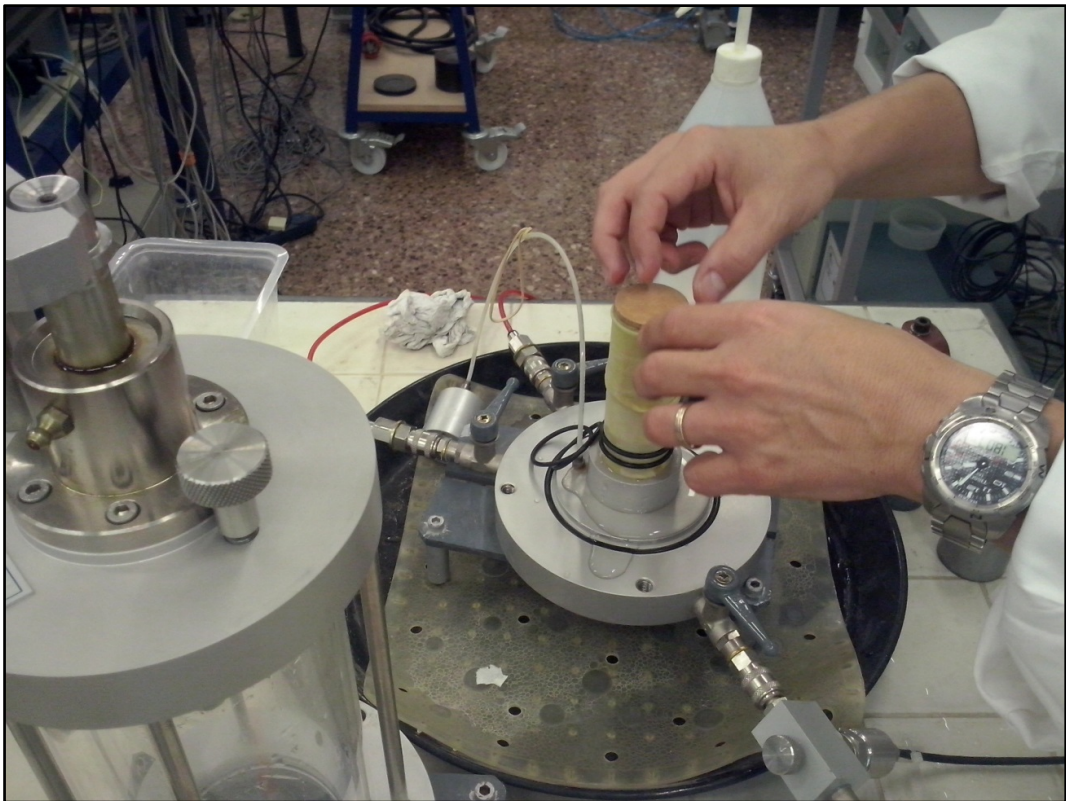


Figura 5.2.138. Colocación de la placa porosa.

Procedimiento de ensayo

Primera fase: Saturación

En primer lugar es necesario verificar el grado de saturación que tiene la muestra. Si no estuviera saturada la muestra, el procedimiento a seguir consiste en aumentar la presión de célula y la presión de cola, midiendo el incremento de presión intersticial que provocan en la muestra.

Para cada incremento de presión se calcula el coeficiente de presión intersticial A, mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c}$$

Si el valor de B es igual o superior a 0.95

Durante este proceso se debe anotar el volumen de agua que se ha introducido en la probeta con cada aplicación de presión de cola, y se calcula el volumen de agua absorbida como la suma de todos ellos.

Al concluir esta fase de saturación se tiene lo siguiente:

- Presión de Célula: $\sigma_{c,sat}$ (kPa)
- Presión de cola: u_c (kPa)
- Presión intersticial: u_{sat} , que usualmente coincide con u_c .
- Coeficiente A, próximo a la unidad.
- Tensión efectiva casi nula: $\sigma'_{c,sat} = \sigma_{c,sat} - u_{sat}$

Segunda fase: Consolidación

Esta fase comienza en las condiciones en que había quedado la probeta al final de la fase de saturación.

Con las llaves de drenaje cerradas, se aumenta la presión de célula:

$$\sigma_{c,con} = \sigma_{c,sat} + \Delta \sigma_c$$

Puesto que la muestra está saturada (fase anterior) y no se permite el drenaje, cuando las presiones intersticiales se hayan estabilizado en toda la probeta, se ha generado un aumento de las presiones intersticiales de la misma magnitud que el incremento de presión de célula aplicado:

$$\Delta u_{cons} = \Delta \sigma_c$$

A partir de este momento se abren las válvulas y se permite el drenaje de la probeta, de modo que comienza la consolidación. Durante este proceso se registra, a intervalos de tiempo prefijados:

- Cambio de volumen de la probeta que coincide con el volumen total de agua expulsada durante el proceso: ΔV_{con} , con el que obtenemos la curva de consolidación (Figura 5.2.139):
- Variación de la presión intersticial.

La consolidación se dará por finalizada cuando se haya disipado por completo el incremento de presión intersticial generado: $\Delta u_{cons} = 0$.

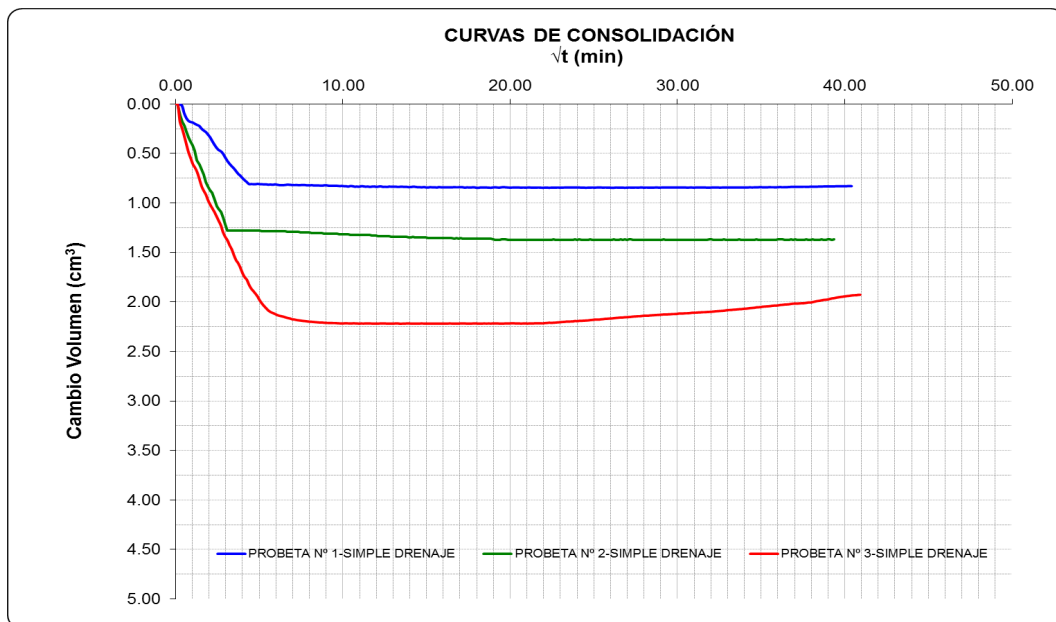


Figura 5.2.139. Curvas de consolidación del ensayo triaxial.

Tercera fase: Rotura

Durante toda esta fase de rotura se mantiene constante la presión de célula y no se permite el drenaje de la probeta, por tanto, no habrá variación de volumen en la muestra.

Únicamente se registra la evolución de las presiones intersticiales (Figura 5.2.140 y Figura 5.2.141), la deformación axial y las cargas verticales, hasta la rotura.

En el momento de la rotura se tienen las siguientes condiciones:

- Presión de célula: $\sigma_c = \sigma_3 = \sigma_{con} = cte$ (kPa), se mantiene constante, con el mismo valor que en la fase de consolidación.
- Presión intersticial: u_R , alcanzada en la probeta como consecuencia de la aplicación del esfuerzo vertical y puesto que el drenaje está impedido.
- - Tensión desviadora: $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_R$ (kPa), es la tensión registrada realmente por la prensa, es decir, la diferencia entre la tensión vertical aplicada por la prensa a la probeta y la presión de célula (Figura 5.2.142).

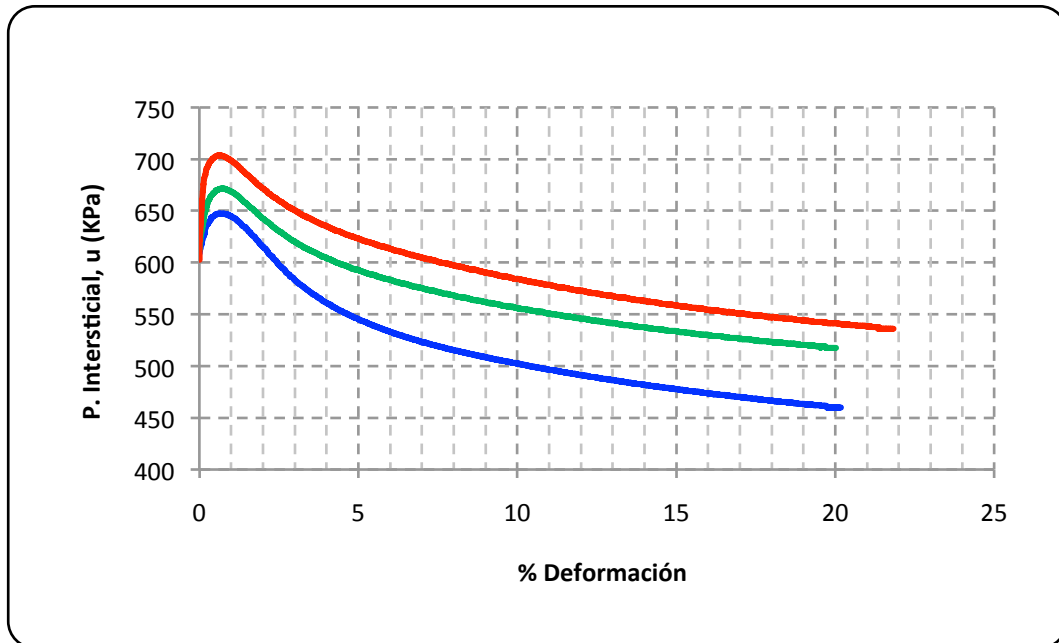


Figura 5.2.140. Evolución de las presiones intersticiales con la deformación de la probeta durante la rotura.

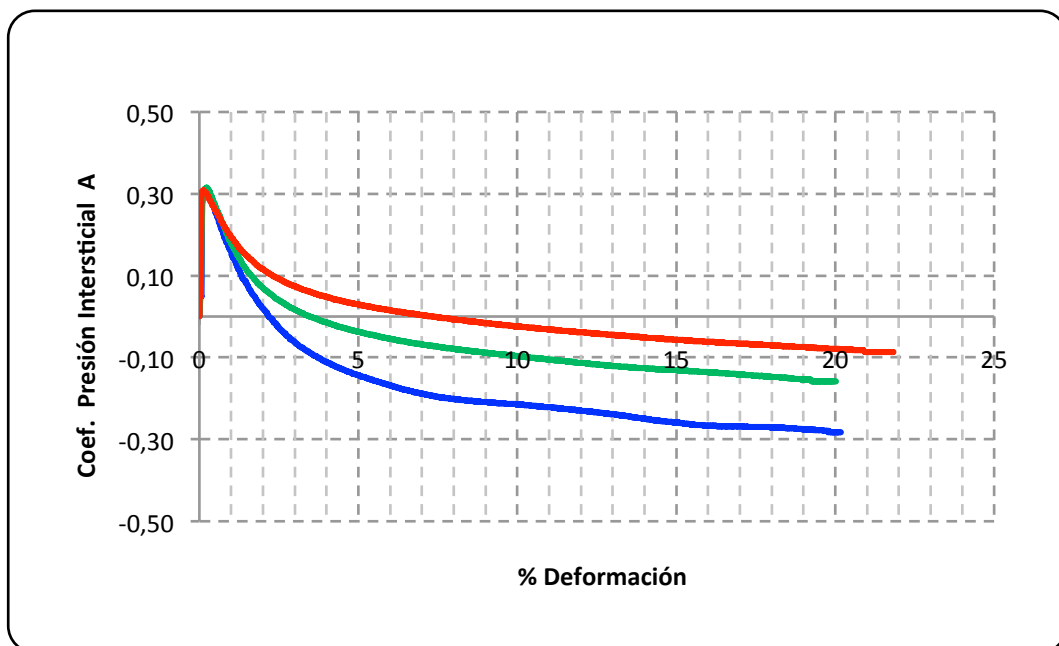


Figura 5.2.141. Evolución del coeficiente de presión intersticial durante el proceso de rotura.

Con estos valores obtenemos el centro (p') y el radio (r') de los correspondientes círculos de Mohr, para cada una de las tres probetas ensayadas, en efectivas:

$$r' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 - uR - \sigma_3 - uR}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = r$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 - uR + \sigma_3 - uR}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot uR}{2} = p - uR$$

Trazando la envolvente de estos círculos se tiene la línea de rotura o envolvente de rotura del suelo. La ordenada en el origen de esta línea será la cohesión y su pendiente, el ángulo de rozamiento del terreno (Figura 5.2.144).

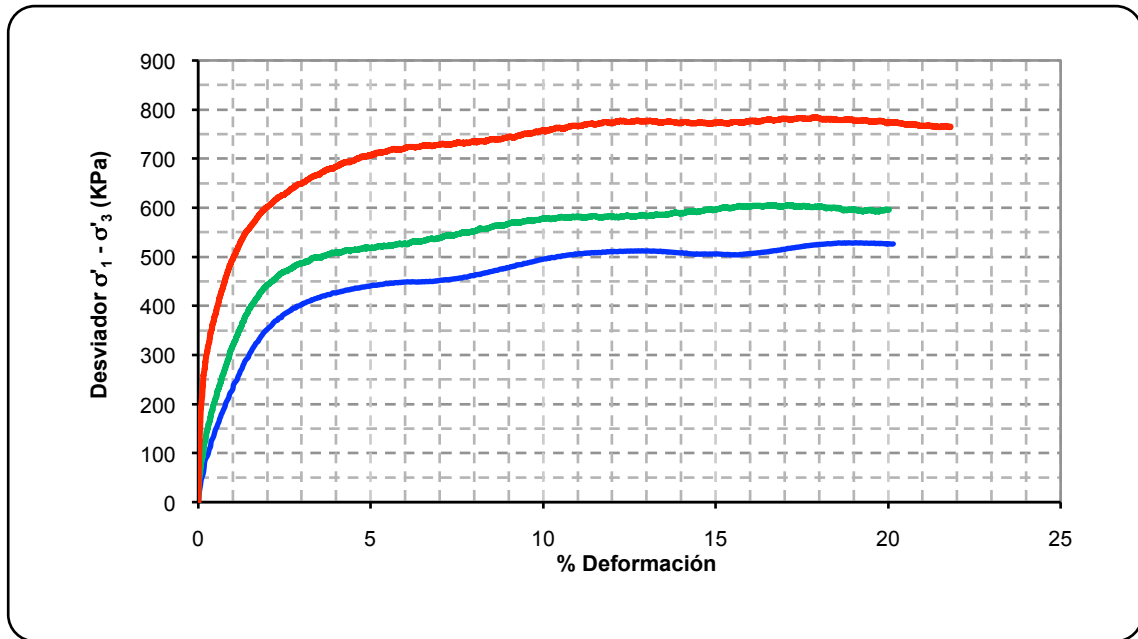


Figura 5.2.142. Evolución del desviador durante el proceso de rotura.

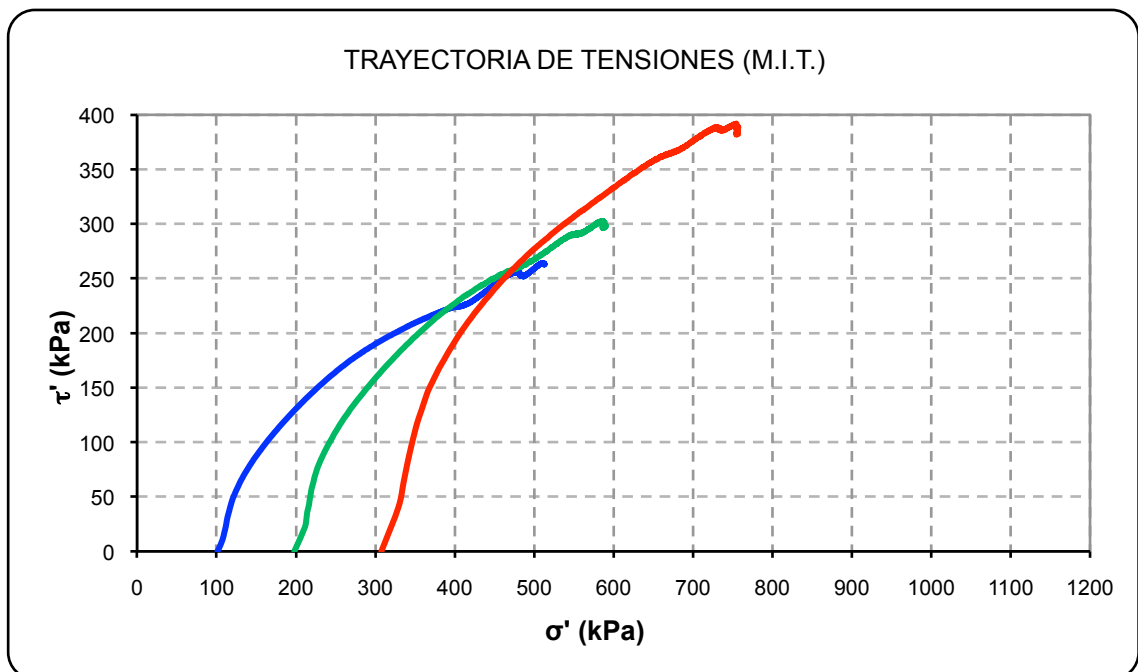


Figura 5.2.143. Trayectoria de tensiones.

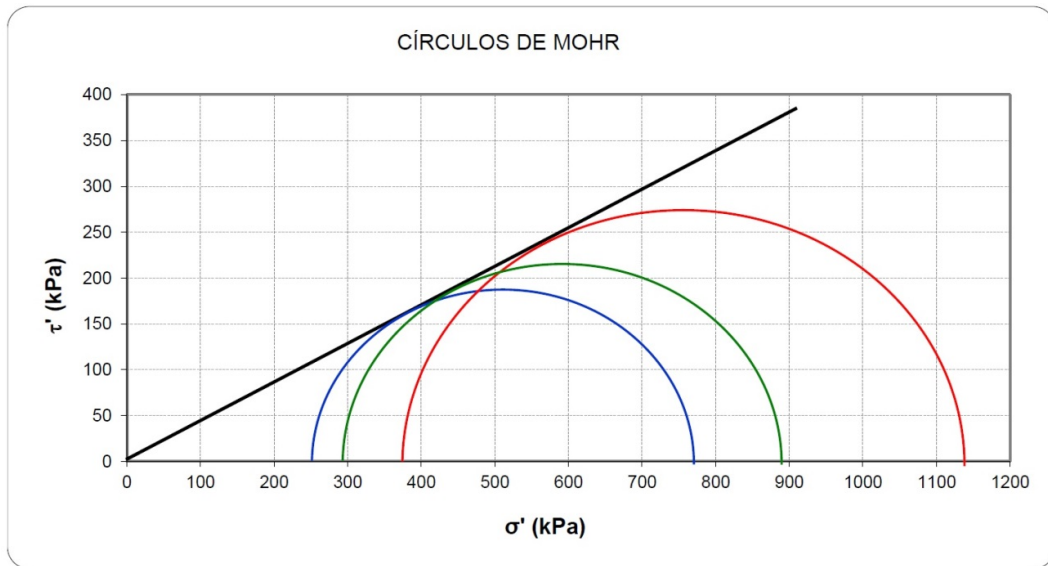


Figura 5.2.144. Gráfica Tensión Tangencial - tensión Normal.



Figura 5.2.145. Aspecto de las probetas tras finalizar el ensayo triaxial.

Una vez finalizado el proceso de rotura, se cierran todas las válvulas y se retira la célula triaxial de la prensa, extrayendo la probeta de su interior.

A continuación se pesa la probeta y se seca en estufa hasta masa constante (Figura 5.2.145). Con estos datos junto con la densidad específica relativa de las partículas, G_s , se calcula la densidad aparente y seca, humedad, grado de saturación e índice de poros, tanto al inicio como al final del ensayo.

Capítulo 5. Metodología

Tal como muestra la Figura 5.2.145 es posible observar y medir el ángulo con el que han roto la probetas (α), lo que nos puede dar una ligera idea del ángulo de rozamiento efectivo (ϕ') que vamos a obtener, según la siguiente relación:

$$\phi' = 90^\circ - \alpha$$

5.3.2.24. Ensayo Dusseault – Inmersión estática

Introducción

Este ensayo fue propuesto por DUSSEULT *et al.* en 1983, para conocer el grado de alterabilidad o durabilidad de una roca cuando ésta se sumerge en agua, así como su evolución a lo largo del tiempo. Al no existir una normativa específica, se utiliza un procedimiento propio adoptado de las recomendaciones del ISRM y del artículo de Dusseault (Garrido *et al.*, 2012).

Preparación de la muestra

Se seleccionará una submuestra representativa del conjunto de la roca a ensayar (Figura 5.2.146).



Figura 5.2.146. Muestra para la realización del ensayo Dusseault.

Procedimiento de Ensayo

En un vaso de vidrio de 600 a 1000 ml se introduce agua destilada hasta una altura suficiente para sumergir la muestra totalmente (Figura 5.2.147).

Se describe la reacción de la muestra en una escala de tiempos de tipo logarítmica: 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 30, 60, min,..., hasta un mínimo de 24 horas. Para ello se utilizan los criterios de la Tabla 5.2.9, representando los resultados en un papel semilogarítmico.



Figura 5.2.147. Fragmento de roca sumergido en agua destilada.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
A	Sin deterioro visible.
B	Algún deterioro (agua limpia, pocos fragmentos o esquirlas).
C	Deterioro medio. Se conserva la forma original pero su superficie está deteriorada.
C1	El agua se enturbia.
C2	El agua está limpia.
D	Gran deterioro. La forma original se destruye casi por completo, saltando fragmentos o esquirlas.
D1	El agua está muy turbia.
D2	El agua está algo turbia.
E	Desintegración total.
E1	El agua queda totalmente turbia.
E2	El agua queda algo turbia.
E3	El agua queda limpia.

Tabla 5.2.9. Determinación de la durabilidad. Dusseault *et al.*, 1983.

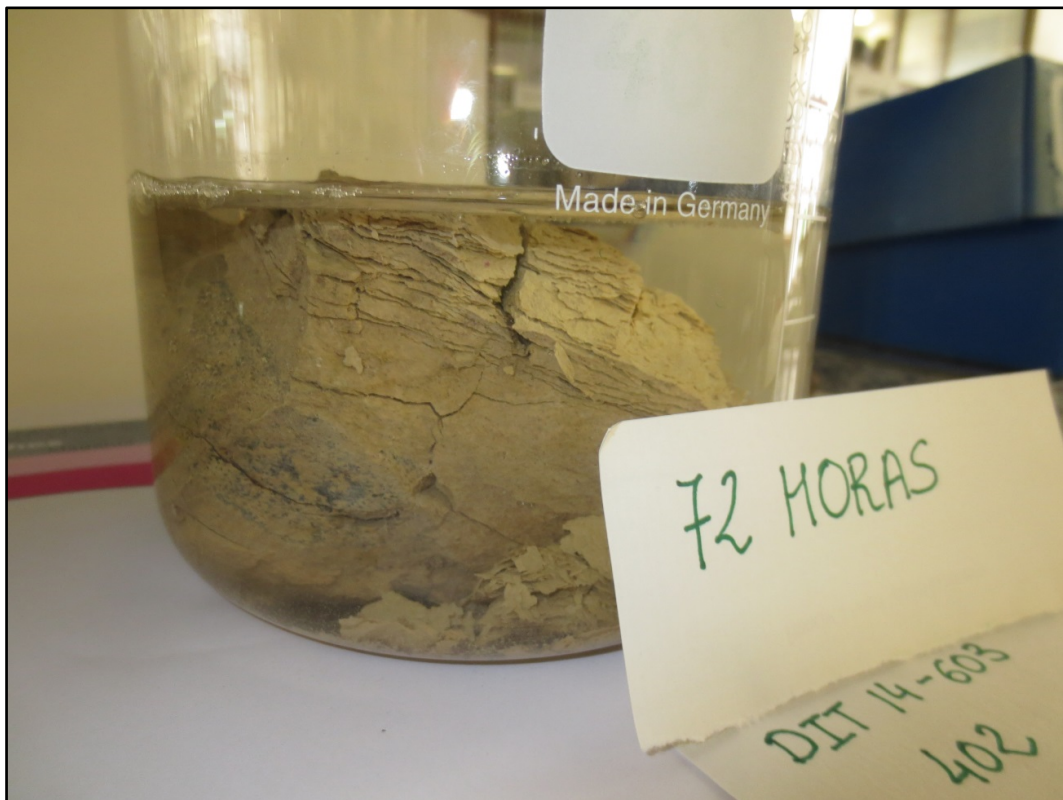


Figura 5.2.148. Aspecto de la muestra de roca tras 72 horas de inmersión en agua.

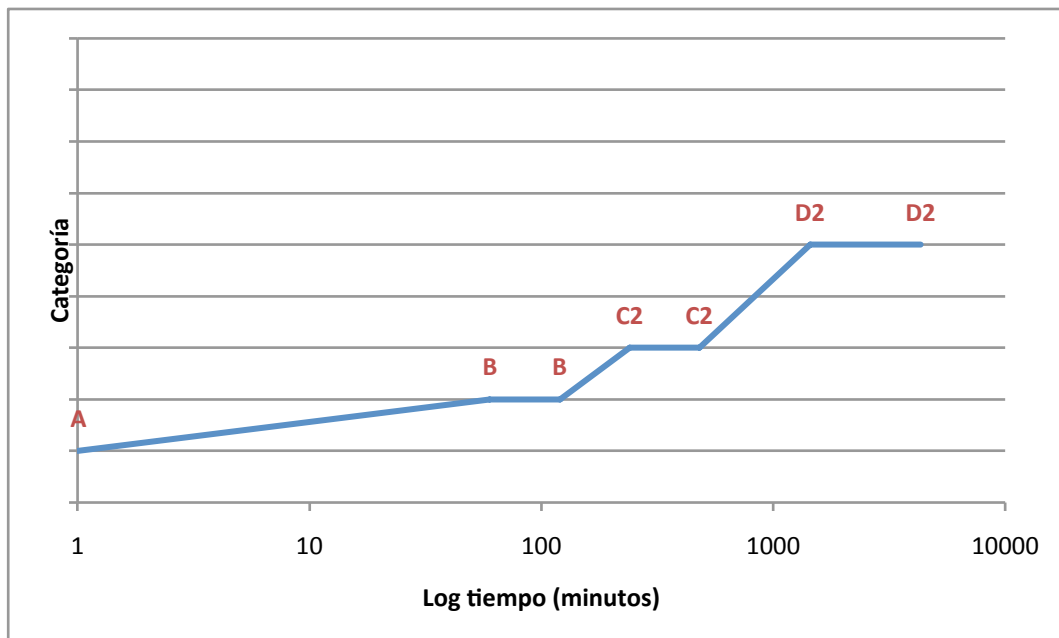


Figura 5.2.149. Representación gráfica de los resultados de un ensayo Dusseault.

Expresión de resultados:

Los resultados se representan de forma gráfica, representando en el eje de abscisas el tiempo que tarda en destruirse la muestra, en forma logarítmica. En la Figura 5.2.149, se representa este tiempo contrastado con las distintas categorías de materiales consideradas por Dusseault.

5.2.2.25 Microscopía electrónica

Se ha utilizado la técnica de microscopía de barrido (MEB; o SEM: *Scanning Electron Microscopy*). El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento capaz de ofrecer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra. Su funcionamiento se basa en barrer un haz de electrones sobre un área del tamaño que deseemos (aumentos) mientras en un monitor se visualiza la información que hayamos seleccionado en función de los detectores que hayan disponibles

El equipo utilizado lleva una microsonda analítica de dispersión de rayos X (EDS). Este EDS es el que recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía de cada rayo X es característica de cada elemento, podemos obtener información analítica cualitativa y cuantitativa de áreas del tamaño que deseemos de la superficie. Por ello se conoce esta técnica como Microanálisis por EDS.



Figura 5.2.150. Equipo de microscopía electrónica utilizado, perteneciente a la UPV.

Capítulo 5. Metodología

Para ello ha sido necesaria la colaboración del Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, usando un aparato marca JEOL, modelo JMS6300 con un EDS de *Oxford Instruments* (Figura 5.2.150).

Gracias a esta técnica se ha realizado un estudio de los rasgos micromorfológicos y un análisis semicuantitativo en puntos concretos de las muestras.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS PROCEDENTES DE DATOS DE LOS PROYECTOS CONSTRUCTIVOS

6.1. INTRODUCCIÓN

En el presente apartado, se procede a realizar el análisis y tratamiento de los datos geotécnicos disponibles de los siguientes proyectos constructivos:

- Proyecto de Construcción. Variante de Alcoy N-340 de Cádiz y Gibraltar a Barcelona P.K. 791.400 a 799.000.
- Proyecto de Construcción. Supresión de dos puentes de carga limitada y Variante de Montaverner en la CN-340 (S) P.k. 825.000 al 829.700.
- Proyecto de Construcción. Terminación de la Variante de la Carretera N-332 del P.K. 175.190 al 179.650. Tramo: Variante de Benissa (Alicante).

6.2. CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA BÁSICA DE LOS MATERIALES DE LAS FACIES TAP

6.2.1 DIT14-201. Variante de Alcoy

En el área correspondiente a la Hoja Magna 821 – Alcoy, encontramos dos litotipos de facies Tap, que en su memoria correspondiente vienen denominados como **El Tap languense** (T_{11}^{Bb}) y como **El Tap Superior** (T_{12-11}^{Bb-Bc}), al que corresponden los datos geotécnicos disponibles en el mencionado proyecto, dado que la Variante de Alcoy discurre en su totalidad sobre este material que corresponde al Mioceno Serravaliense.

6.2.2 DIT14-601. Variante de Montaverner

En el área correspondiente a la Hoja Magna 795 – Játiva, encontramos un litotipo de facies Tap, que en su memoria correspondiente viene denominado como **Margas en facies «TAP»** (Tm_{1-11}^{Bb-Bc}) sobre el que discurre la mayor parte del trazado del mencionado proyecto.

6.2.3 DIT14-1001. Variante de Benisa

En el área correspondiente a la Hoja Magna 822 – Benisa, encontramos un litotipo de facies Tap, que en su memoria correspondiente se describe como “margas blancas y niveles turbidíticos. Facies “Tap”. Mioceno medio. (Langhiense-Serravaliense)”.

6.3. PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS

6.3.1 Generalidades

Se denominan parámetros de identificación a aquellos que dependen de la naturaleza de las partículas del suelo, pero no de su estado de agregación o compacidad. Para su determinación, por tanto, no se requieren muestras inalteradas del suelo, sino que basta que sean representativas de sus componentes.

Estos parámetros que principalmente son los relacionados con la granulometría, la plasticidad y la mineralogía, se han obtenido, para los datos disponibles del proyecto de la Variante de Alcoy, mediante los siguientes ensayos:

- Ensayo de Granulometría por tamizado
- Límites de Atterberg (Límite líquido y límite plástico).
- Contenido en carbonatos, sulfatos y materia orgánica.
- Ensayo CBR.

6.3.2 Granulometría

6.3.2.1 Introducción

Los ensayos de granulometría tienen por finalidad determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño. En función de esta distribución, los suelos pueden clasificarse (Moralejo, 2011).

Los datos de los que disponemos, obtenidos a partir de la realización de ensayos de granulometría por tamizado (UNE-EN 933-1), únicamente nos ofrecen información de los porcentajes de grava, arena y finos.

Desde el punto de vista de la granulometría los materiales se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, tal y como se muestra en la Tabla 6.3.1.

Los dos primeros tipos de suelos, gravas y arenas, se consideran como materiales granulares, mientras que los dos últimos, limos y arcillas, formados por partículas apenas visibles, son considerados como elementos finos.

Fracciones	Subdivisiones	Diámetros de partículas (mm)
Suelos gruesos	Grava	$2,0 < \phi < 63$
	Grava gruesa	$20 < \phi < 63$
	Grava media	$6,3 < \phi < 20$
	Grava fina	$2,0 < \phi < 6,3$
	Arena	$0,063 < \phi < 2,0$
	Arena gruesa	$0,63 < \phi < 2,0$
	Arena media	$0,2 < \phi < 0,63$
	Arena fina	$0,063 < \phi < 0,2$
Suelos finos	Limos	$0,002 < \phi < 0,063$
	Limos gruesos	$0,02 < \phi < 0,063$
	Limos medios	$0,006 < \phi < 0,02$
	Limos finos	$0,002 < \phi < 0,006$
	Arcillas	$\phi \leq 0,002$

Tabla 6.3.1. Fracciones de tamaños de partículas.

6.3.2.2 DIT14-201. Variante de Alcoy

El material mioceno margoso sobre el que discurre el trazado de la Variante de Alcoy es esencialmente fino.

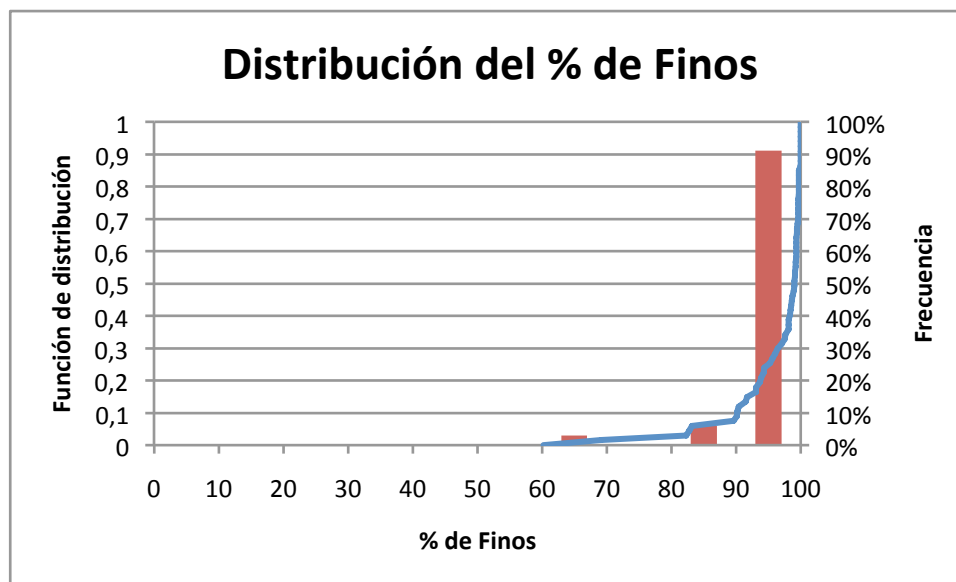


Figura 6.3.1. Distribución del % de finos.

De los datos de los que disponemos del proyecto de la Variante de Alcoy, 22 muestras han sido extraídas mediante calicatas y 108 mediante sondeos. Se ha realizado en ensayo granulométrico por tamizado a todas las muestras extraídas mediante calicata y a 46 de las 108 extraídas mediante sondeo. La Figura 6.3.1 muestra la función de distribución del porcentaje de finos de

todas las muestras sobre las que se ha realizado en ensayo de granulometría por tamizado, así como el histograma de frecuencias.

La función de distribución muestra que el material es muy uniforme y que está compuesto principalmente por finos, ya que más del 90 % de las muestras ensayadas tiene más de un 90% de finos, lo que permite suponer que esta unidad se trata de una unidad cuyos materiales pueden considerarse impermeables (Moralejo, 2011).

La Figura 6.3.2 muestra la relación entre el % de finos y la profundidad. Dado que el material es muy uniforme y con un alto contenido en finos, no se aprecia una tendencia clara. Sin embargo, se puede observar que todas las muestras que tienen un porcentaje de finos menor al 90 % han sido extraídas a menos de 10 metros de profundidad. El hecho de que las capas superficiales tengan menor contenido en finos puede deberse a que al efectuarse las calicatas los materiales del "Tap" se hayan mezclado con los superiores, depósitos cuaternarios (Moralejo, 2011).

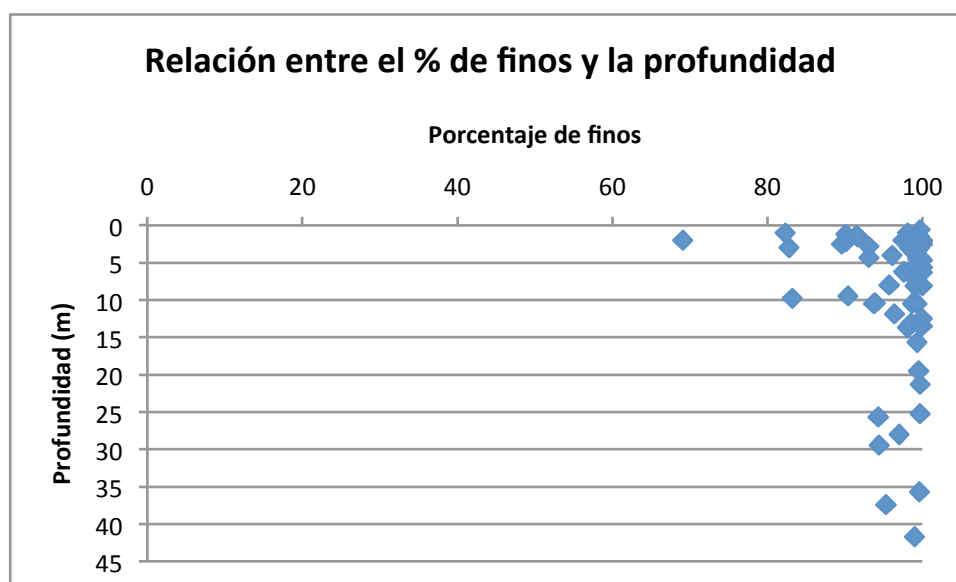


Figura 6.3.2. Relación entre el % de finos y la profundidad.

6.3.2.3 DIT14-601. Variante de Montaberner

Todos los ensayos de granulometría realizados sobre el material Tap de esta área (4 en muestra procedente de sondeo y 7 en muestra procedente de calicatas) dan como resultado un 100 % de finos.

6.3.2.4 DIT14-1001. Variante de Benisa

Se dispone de datos correspondientes a 9 calicatas y 13 sondeos ejecutados sobre facies Tap, habiéndose realizado 21 ensayos de granulometría (uno por cada calicata y 12 sobre la muestra extraída mediante sondeo). En la Figura 6.3.3 se observa la distribución del porcentaje de finos. En este caso nos encontramos con una muestra mucho más heterogénea que en los casos anteriores, con un porcentaje de finos generalmente menor.

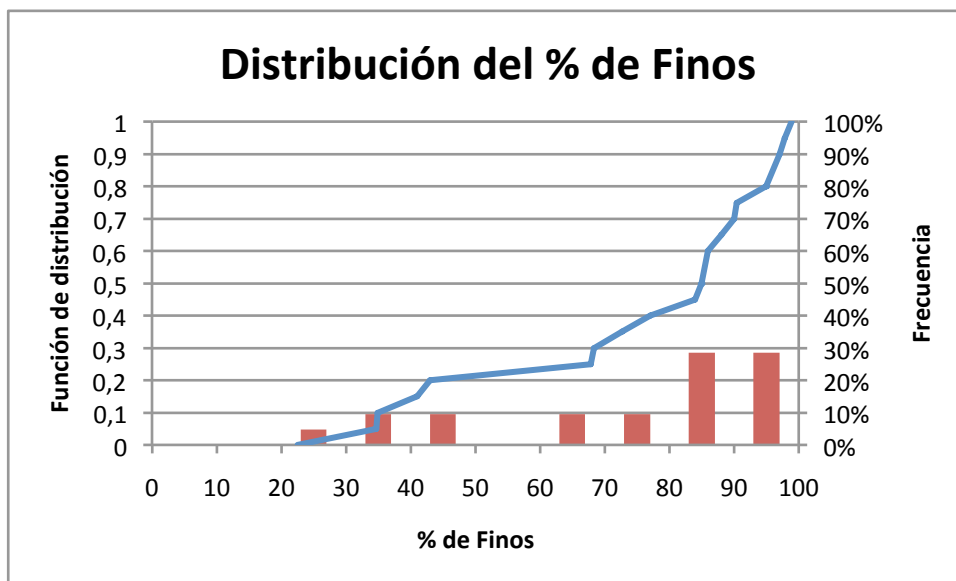


Figura 6.3.3. Distribución del % de Finos. DIT14-1001.

No se observa una relación entre el porcentaje de finos y la profundidad a la que ha sido extraída la muestra, sin embargo en la Figura 6.3.4, se aprecia la existencia de resultados que dan un % de finos bastante bajo, como para tratarse de un material arcilloso. Este hecho puede deberse a que el material mioceno margoso del Tap se encuentre entremezclado con depósitos cuaternarios.

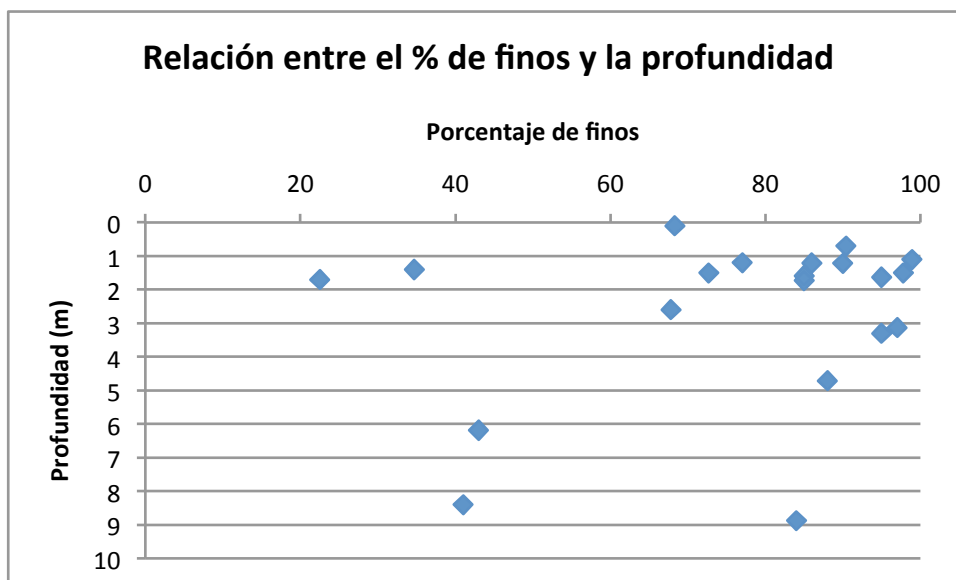


Figura 6.3.4. Relación entre el % de finos y la profundidad. DIT14-1001.

6.3.3 Características plásticas

6.3.3.1 Introducción

Los límites líquido (LL) y plástico (LP), establecidos por Atterberg, definen y cuantifican la transición entre el estado líquido, plástico y frágil del comportamiento de un suelo. Concretamente se definen como la humedad gravimétrica a la que un suelo pasa del estado plástico al líquido (LL), y la humedad a la que el suelo pasa del estado plástico al frágil (LP), ambas expresadas en porcentaje. La diferencia numérica entre los límites líquido y plástico se define como índice de plasticidad (IP). Por tanto, los límites se usan como indicadores sencillos de obtener del comportamiento mecánico del suelo. El valor del límite líquido está directamente relacionado con el porcentaje de partículas finas del suelo, y también influyen sobre él el tipo de mineral de arcilla, su superficie específica y los cationes del complejo de cambio (Peña *et al.*, 2004).

6.3.3.2 DIT14-201. Variante de Alcoy

La Tabla 6.3.2 muestra unos valores estadísticos representativos de las 69 muestras, procedentes tanto de calicatas como de sondeos, a las que se les ha realizado los ensayos de determinación del límite líquido y de determinación del límite plástico.

	LL%	LP%	IP%
Nº de muestras	69	69	69
Valor máximo	80.0	41.8	50.2
Valor mínimo	19.2	11.8	0.2
Media	47.9	19.5	28.4
Desviación típica	12.9	4.33	11.2
Coficiente de variación	27.0 %	22.2 %	39.5 %

Tabla 6.3.2. Resultados de los ensayos de plasticidad. DIT14-201.

Según Atterberg, cuando un suelo tiene un índice de plasticidad igual a cero es no plástico; cuando el índice de plasticidad es menos de 7, el suelo presenta baja plasticidad; cuando el índice de plasticidad está comprendido entre 7 y 17 se dice que el suelo es medianamente plástico y cuando el suelo presenta un índice de plasticidad mayor de 17 se dice que es altamente plástico (Moralejo, 2011).

Se puede decir que este suelo es altamente plástico por tener un I.P. medio de 28.4, un valor muy superior al límite establecido por Atterberg para separar los suelos medianamente plásticos de los altamente plásticos.

6.3.3.3 DIT14-601. Variante de Montaberner

La Tabla 6.3.3 muestra unos valores estadísticos representativos de 10 muestras, procedentes tanto de calicatas (6) como de sondeos (4), a las que se les ha realizado los ensayos de determinación del límite líquido y de determinación del límite plástico.

	LL%	LP%	IP%
Nº de muestras	10	10	10
Valor máximo	49	28.7	24
Valor mínimo	33	21	9.7
Media	40.61	25.26	15.35
Desviación típica	5.00	2.39	4.68
Coficiente de variación	12.31 %	9.44 %	30.46 %

Tabla 6.3.3. Resultados de los ensayos de plasticidad. DIT14-601.

Según Attenberg este suelo es medianamente plástico por tener un I.P. medio de 15.35.

6.3.3.4 DIT14-1001. Variante de Benisa

La Tabla 6.3.4 muestra los valores estadísticos representativos de 19 muestras, procedentes tanto de calicatas (9) como de sondeos (10), a las que se les ha realizado los ensayos de determinación del límite líquido y de determinación del límite plástico.

	LL%	LP%	IP%
Nº de muestras	19	19	19
Valor máximo	36.2	25.7	16
Valor mínimo	25.5	16	4.5
Media	30.88	20.77	10.12
Desviación típica	3.13	3.24	3.13
Coficiente de variación	10.14 %	15.62 %	30.92 %

Tabla 6.3.4. Resultados de los ensayos de plasticidad. DIT14-1001.

Según Attenberg este suelo es medianamente plástico por tener un I.P. medio de 10.12.

6.3.4 Clasificación de suelos

6.3.4.1 Introducción

El *Unified Soil Classification System, USCS*, fue formulado por Casagrande como una modificación y adaptación más general de su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos.

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

El procedimiento fue posteriormente modificado (1952) por el mismo autor y el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos, quienes hicieron que fuera más aplicable a los propósitos ingenieriles.

Actualmente cuenta con amplia aceptación y es el más utilizado por la mayor parte de los ingenieros civiles en todo el mundo.

El sistema *USCS* utiliza los siguientes criterios de clasificación:

- Distribución del tamaño de partículas: granulometría por tamizado.
- Límites de consistencia: límite líquido e índice de plasticidad, que se introducen en la *Carta de Plasticidad*, ideada por Casagrande (1932) en base a investigaciones realizadas en laboratorio.
- Contenido de materia orgánica y como ésta interacciona con la fase líquida del suelo y el resto de partículas sólidas.

Esta clasificación divide los suelos en cuatro grandes categorías: suelos de grano fino, suelos de grano grueso, turbas y suelos orgánicos.

Su objetivo es establecer un lenguaje común y relacionar propiedades con determinados grupos de suelos, considerando el suelo como material de construcción.

Existen otros sistemas de clasificación de suelos de aplicación en obra civil, como el sistema *AASHTO*, American Association of State Highway Officials, o el *BS*, Sistema Británico.

Procedimiento

Se designa el suelo mediante letras que hacen referencia a las iniciales de sus nombres en inglés:

1. PREFIJO: Grupo principal al que pertenece el suelo.

Tipo de suelo	Prefijo
Grava (G avel)	G
Arena (S and)	S
Limo (M ud)	M
Arcilla (C lay)	C
Orgánico (O rganic)	O
Suelos altamente orgánicos/Turbas (P eat)	P_t

Tabla 6.3.5. Prefijo: Grupo principal al que pertenece el suelo. Tomado de Garrido *et al.*, 2012.

2. SUFIJO: Subdivisiones dentro de los grupos principales.

Subdivisiones de grupos	Sufijo
Alta plasticidad (H igh plasticity)	H
Baja plasticidad (L ow plasticity)	L
Bien graduada (W ell graded)	W
Mal graduada (P oorly graded)	P

Tabla 6.3.6. Sufijo: Subdivisiones dentro de los grupos principales. Tomado de Garrido *et al.*, 2012.

El código que se adjudica a cada suelo constará de un prefijo y uno o dos sufijos. Las combinaciones posibles son:

- Los sufijos **H** y **L** únicamente pueden acompañar a los prefijos **M**, **C** y **O**.
- Los sufijos **W** y **P** únicamente pueden acompañar a los prefijos **S** y **G**.
- Los prefijos **M** y **C** pueden actuar de sufijos con los prefijos **S** y **M**.

Suelo de grano fino

Cuando el 50 % o más de las partículas de un suelo tiene un tamaño inferior a 0.080 mm (% Pasa 0.080 \geq 50 % Muestra Total), éste se clasifica como un suelo de **grano fino**.

El criterio que utiliza el sistema SUCS para la clasificación de suelos finos es el de los *límites de Atterberg*, luego para poder emplear este sistema es necesario conocer el **Límite Líquido** y el **Índice de plasticidad** del suelo y su posición en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

La Carta de Plasticidad de Casagrande es una gráfica donde se representa el *límite líquido* en el eje de abscisas y el *índice de plasticidad* en el eje de ordenadas a escala natural.

6.3.4.2 DIT14-201. Variante de Alcoy

En la Figura 6.3.5 se observa la posición de todas las muestras del sustrato mioceno ensayadas dentro de la Carta de Plasticidad de Casagrande.

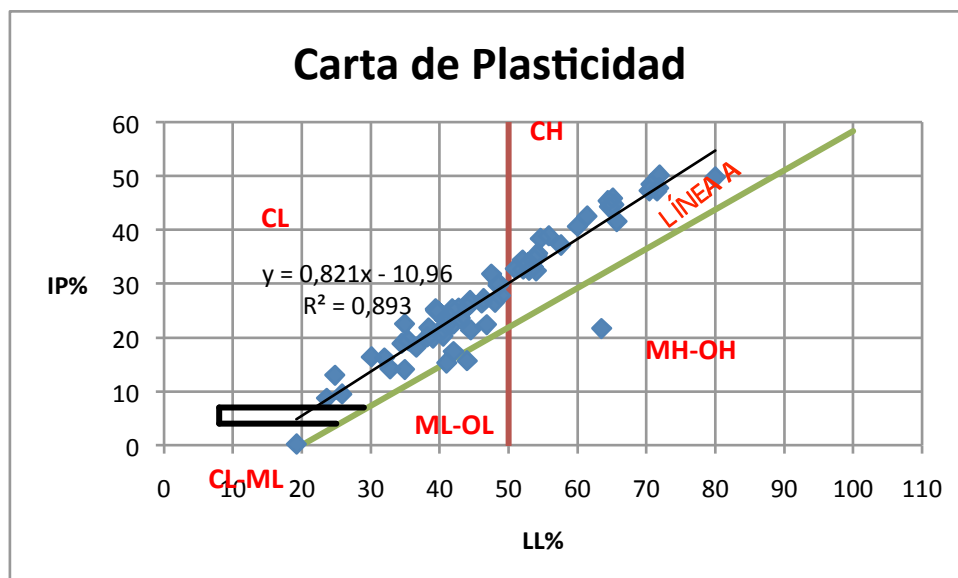


Figura 6.3.5. Carta de plasticidad de los suelos del sustrato mioceno. DIT14-201.

De la Carta de Plasticidad se puede concluir que la mayoría de muestras son arcillas de baja plasticidad y arcillas de alta plasticidad (CL y CH) siendo las primeras predominantes.

La Figura 6.3.6 y la Figura 6.3.7 muestran, respectivamente, la relación entre el Índice de Plasticidad y el Límite Líquido con el porcentaje de finos de las muestras. Debido a la alta uniformidad granulométrica de las muestras, no es posible asociar a estas distribuciones una línea de tendencia que establezca de forma más o menos consistente la relación entre estos parámetros. Sin embargo, observando las gráficas se puede concluir que las muestras que tienen un menor porcentaje de finos (< 90 %) dan valores del límite líquido y del índice de plasticidad menores en comparación con el resto.

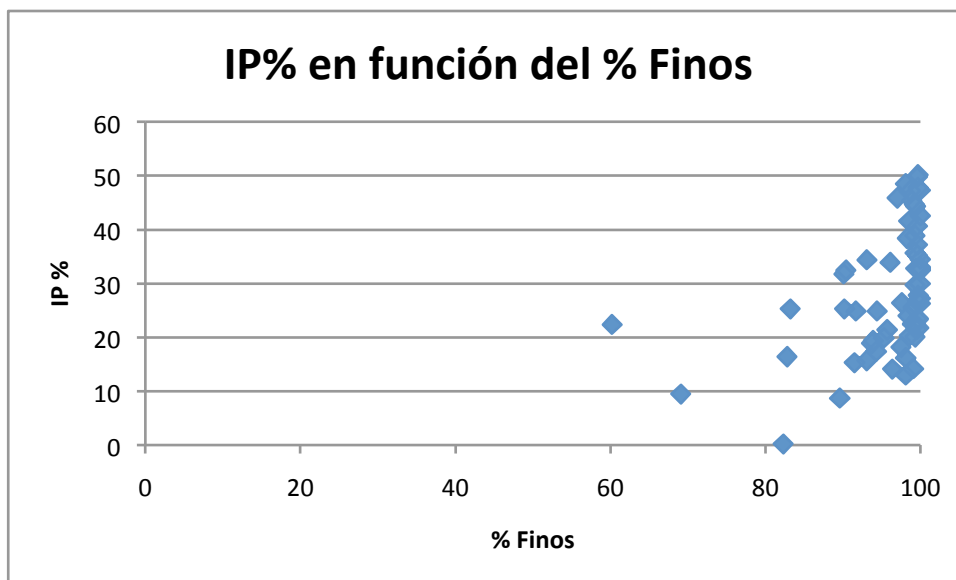


Figura 6.3.6. Relación entre el Índice de Plasticidad y el porcentaje de finos. DIT14-201.

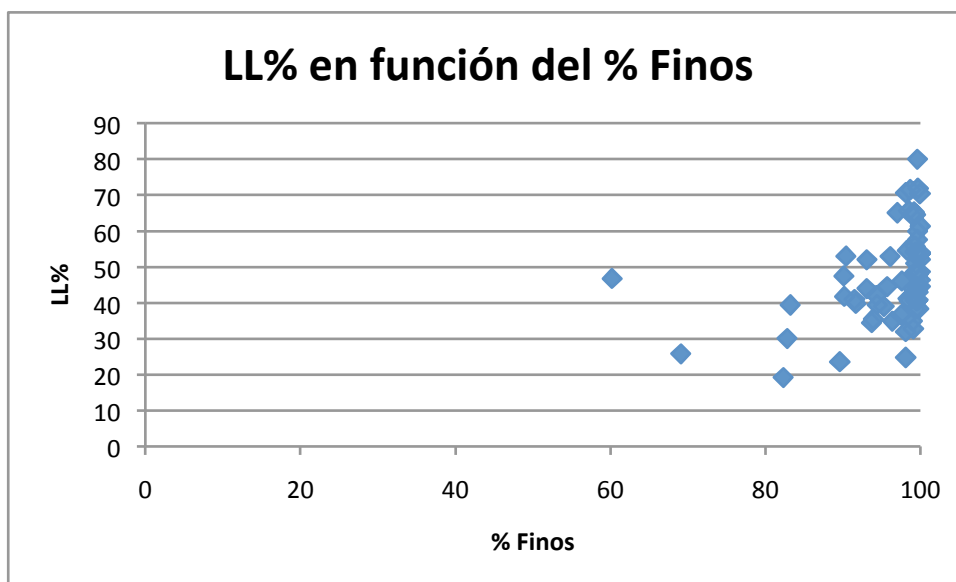


Figura 6.3.7. Relación entre el Límite Líquido y el porcentaje de finos. DIT14-201.

De la misma forma, tampoco es posible encontrar una relación clara entre el Índice de Plasticidad y la profundidad de la muestra (Figura 6.3.8).

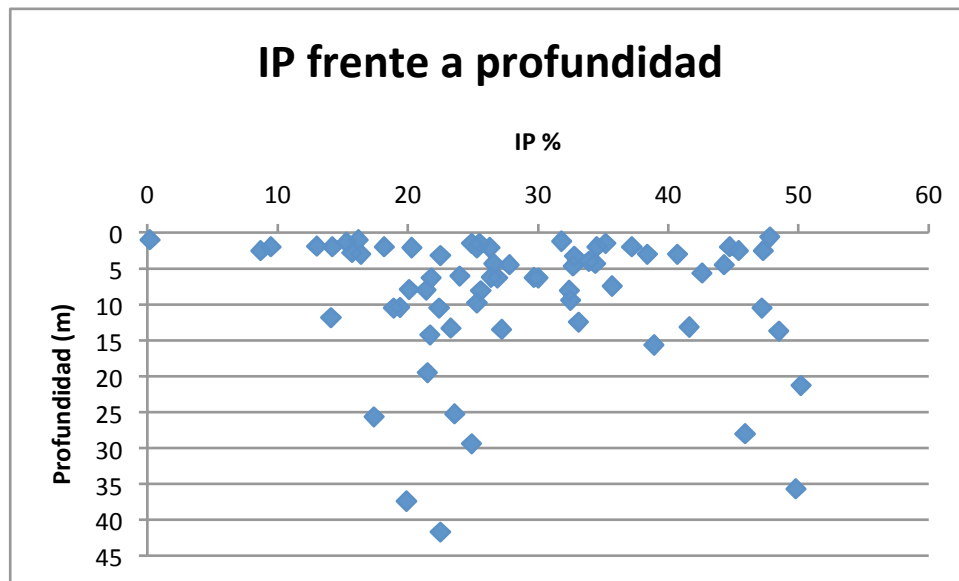


Figura 6.3.8. Relación entre el Índice de Plasticidad y la profundidad. DIT14-201.

6.3.4.3 DIT14-601. Variante de Montaberner

En la Figura 6.3.9 se observa la posición de todas las muestras del sustrato mioceno ensayadas dentro de la Carta de Plasticidad de Casagrande.

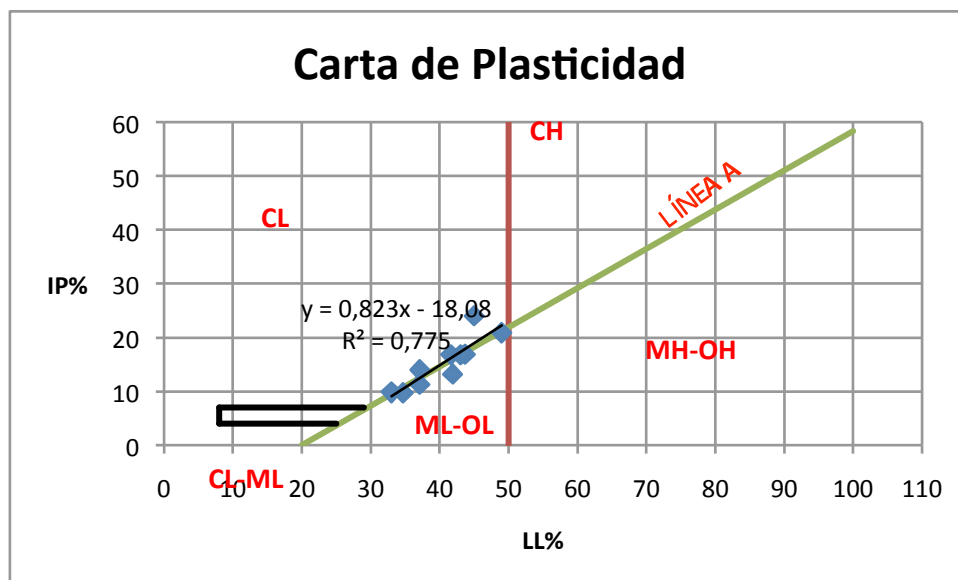


Figura 6.3.9. Carta de plasticidad de los suelos del sustrato mioceno. DIT14-601.

De la Carta de Plasticidad se puede concluir que la mayoría de muestras son arcillas y limos de baja plasticidad. Debido a que el porcentaje de materia orgánica obtenido en los ensayos no es

muy alto (0.57 %), tal y como se verá en el siguiente subapartado se descarta la existencia de muestras clasificadas como suelo orgánico de baja plasticidad (OL).

La Figura 6.3.10 y la Figura 6.3.11 muestran, respectivamente, la relación entre el Índice de Plasticidad y el Límite Líquido con el porcentaje de finos de las muestras. Debido a la alta uniformidad granulométrica de las muestras, ya que todas las muestras se componen en su totalidad de partículas que pasan por el tamiz ASTM N° 200 (0.08 mm) no es posible asociar a estas distribuciones una línea de tendencia que establezca de forma más o menos consistente la relación entre estos parámetros.

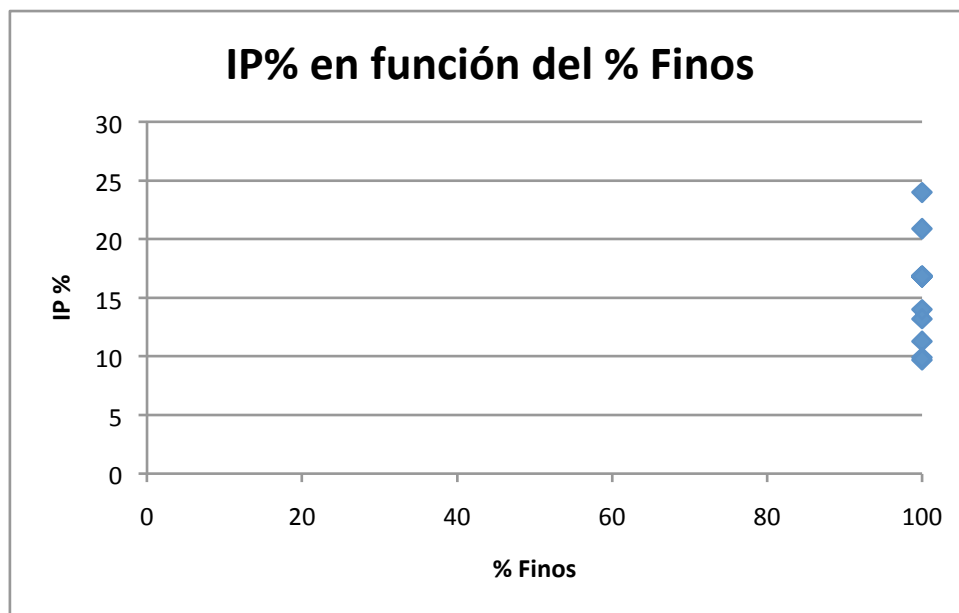


Figura 6.3.10. Relación entre el Índice de Plasticidad y el porcentaje de finos. DIT14-601.

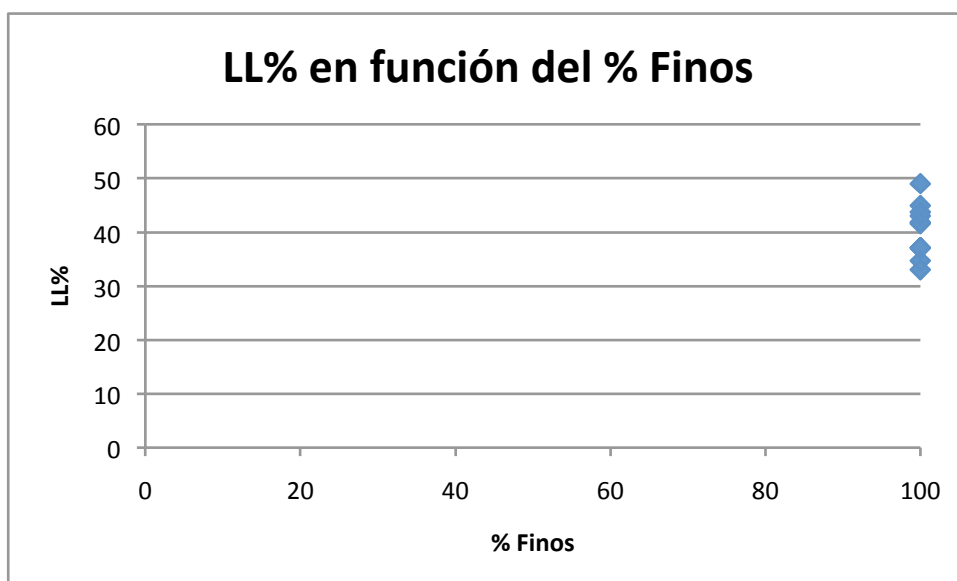


Figura 6.3.11. Relación entre el Límite Líquido y el porcentaje de finos. DIT14-601.

En la Figura 6.3.12 se muestra la relación entre el Índice de Plasticidad y la profundidad. Aunque no es posible definir una línea de tendencia clara que explique esta relación se observa que los valores del Índice de Plasticidad más altos se obtienen de las muestras extraídas mediante calicatas, es decir, las que se hallan a menor profundidad.

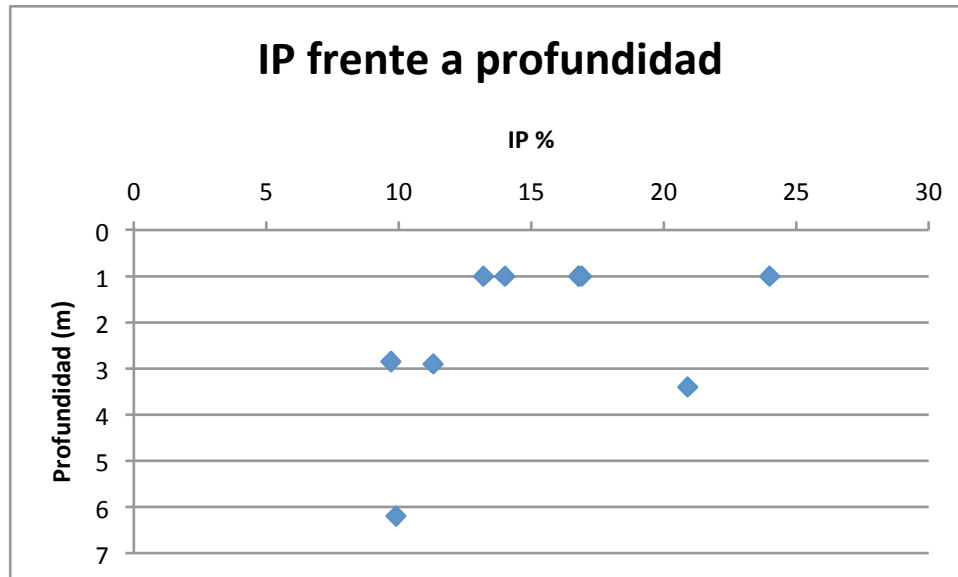


Figura 6.3.12. Relación entre el Índice de Plasticidad y el porcentaje de finos. DIT14-601.

6.3.4.4 DIT14-1001. Variante de Benisa

En la Figura 6.3.13 se observa la posición de todas las muestras del sustrato mioceno ensayadas dentro de la Carta de Plasticidad de Casagrande.

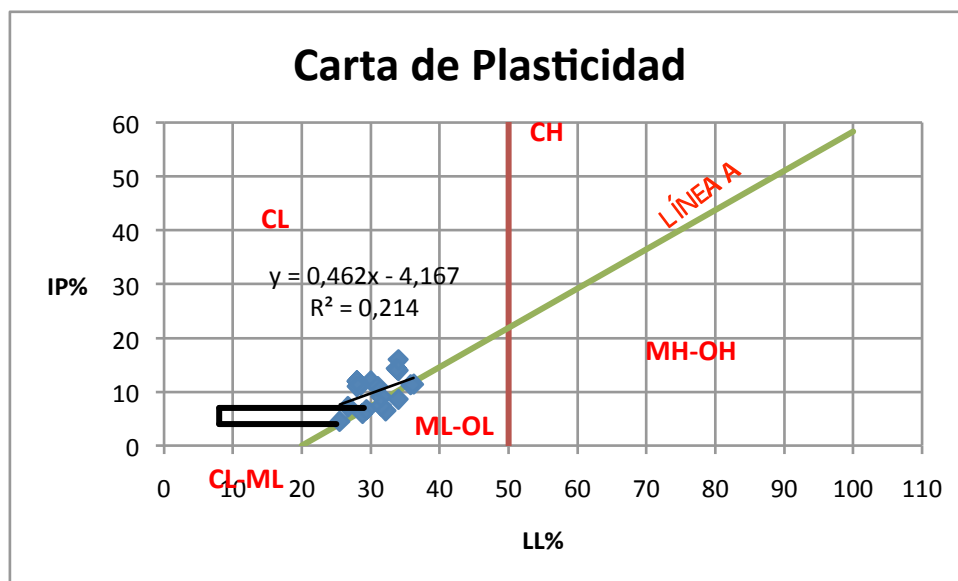


Figura 6.3.13. Carta de Plasticidad de las muestras del sustrato mioceno. DIT14-1001.

De la Carta de se puede concluir que la mayoría de muestras son arcillas y limos de baja plasticidad. Debido a que el porcentaje de materia orgánica obtenido en los ensayos no es muy alto (todos inferiores al 1 %), tal y como se verá en el siguiente subapartado se descarta la existencia de muestras clasificadas como suelo orgánico de baja plasticidad (OL).

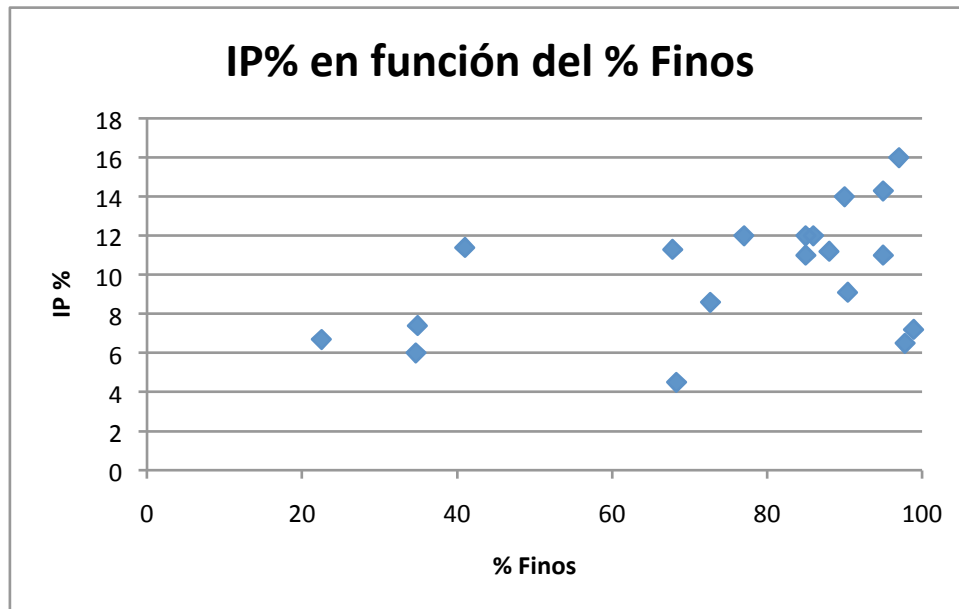


Figura 6.3.14. Relación entre el Índice de Plasticidad y el porcentaje de finos. DIT14-1001.

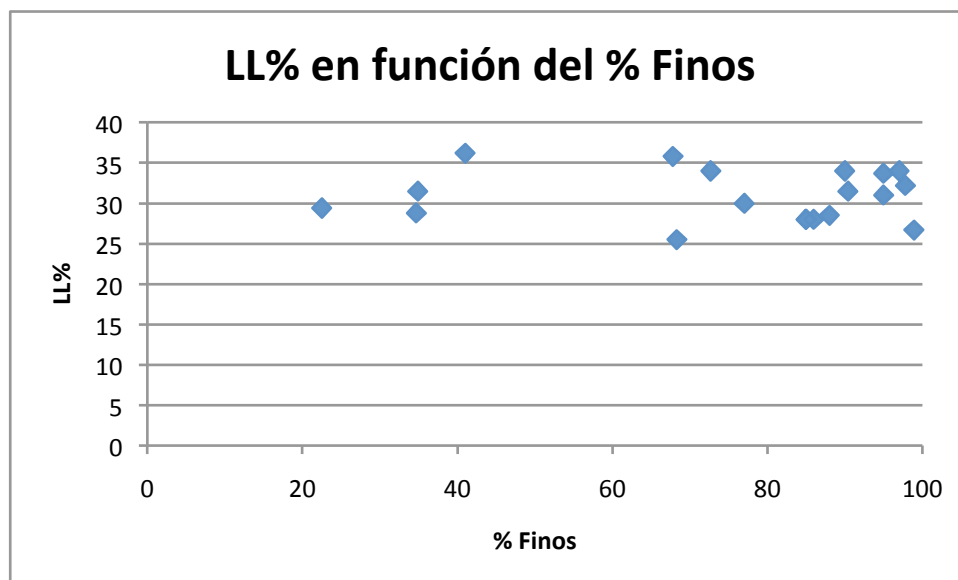


Figura 6.3.15. Relación entre el Límite Líquido y el porcentaje de finos. DIT14-1001.

La Figura 6.3.14 y la Figura 6.3.15 muestran, respectivamente, la relación entre el Índice de Plasticidad y el Límite Líquido con el porcentaje de finos de las muestras. Se observa que en cierta medida los valores del Índice de Plasticidad mayores corresponden a las muestras con un mayor

porcentaje de finos, no pudiéndose establecer una relación clara entre el Límite Líquido y el porcentaje de finos de las muestras.

En la Figura 6.3.16 se muestra la relación entre el Índice de Plasticidad y la profundidad. Aunque no es posible definir una línea de tendencia clara que explique esta relación se observa que los valores del Índice de Plasticidad más bajos se obtienen de las muestras extraídas a menor profundidad.

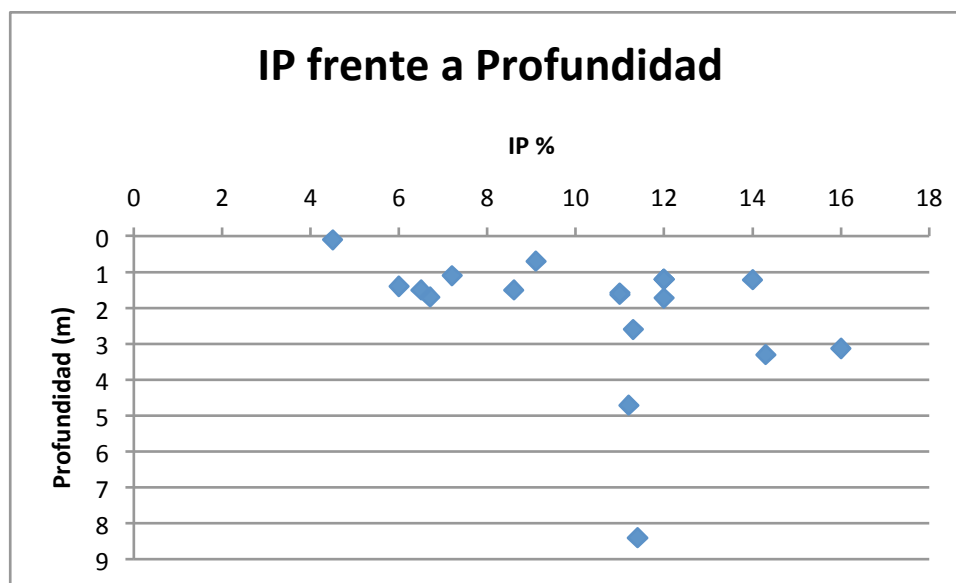


Figura 6.3.16. Relación entre el Índice de Plasticidad y la profundidad. DIT14-1001.

6.3.5 Análisis químicos

6.3.5.1 Introducción

La determinación de la cantidad de ciertos componentes químicos que el suelo contiene resulta esencial, ya que los pliegos de condiciones determinan una serie de umbrales para acotar el uso y aprovechamiento de los materiales en función de diferentes características, entre ellas el contenido en ciertos compuestos químicos. La agresividad al hormigón, la excesiva compresibilidad, problemas de colapsabilidad, etc. Son consecuencia directa de la presencia de algunos de estos compuestos (Moralejo, 2011).

6.3.5.2 DIT14-201. Variante de Alcoy

Se han realizado diferentes ensayos en las muestras del proyecto de la Variante de Alcoy:

- Se han realizado 2 ensayos de determinación de materia orgánica en suelos según UNE 103-204.
- Se han realizado 4 ensayos de contenido de carbonato en suelos según UNE 103-200.

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

- Se han realizado 3 ensayos de determinación del contenido de sulfatos solubles según UNE 103-201.

Los resultados (Tabla 6.3.7) servirán para poder clasificar los materiales para su posterior aprovechamiento.

	M.O. %	CaCO ₃ %	SO ₃ %
Nº de muestras	2	4	3
Valor máximo	0.328	63.84	0.0878
Valor mínimo	0.175	39.16	0.0095
Media	0.2515	53.685	0.03787
Desviación típica	0.11	10.43	0.0434
Coefficiente de variación	43.02 %	19.43 %	114.55 %

Tabla 6.3.7. Ensayos químicos. DIT14-201.

6.3.5.3 DIT14-601. Variante de Montaberner

Se han realizado diferentes ensayos en las muestras del proyecto de la Variante de Montaberner:

- Se han realizado 2 ensayos de determinación de materia orgánica en suelos según UNE 103-204.
- Se han realizado 4 ensayos de contenido de carbonato en suelos según UNE 103-200.
- Se han realizado 3 ensayos de determinación del contenido de sulfatos solubles según UNE 103-201.

Al igual que en el caso de Alcoy, los resultados (Tabla 6.3.8) servirán para poder clasificar los materiales para su posterior aprovechamiento.

	M.O. %	CaCO ₃ %	SO ₃ %
Nº de muestras	2	4	3
Valor máximo	0.57	55.6	0.098
Valor mínimo	0.57	43.53	0.04
Media	0.57	49.8	0.066
Desviación típica	0	6.49	0.03
Coefficiente de variación	0 %	13.04 %	44.64 %

Tabla 6.3.8. Ensayos químicos. DIT14-601.

6.3.5.4 DIT14-1001. Variante de Benisa

Se han realizado 9 ensayos de determinación de materia orgánica en suelos según UNE 103-204 en las muestras del proyecto de la Variante de Benisa.

Análogamente a lo reflejado anteriormente, los resultados (Tabla 6.3.9) servirán para poder clasificar los materiales para su posterior aprovechamiento.

	M.O. %
Nº de muestras	9
Valor máximo	0.9
Valor mínimo	0.3
Media	0.51
Desviación típica	0.25
Coefficiente de variación	49.35 %

Tabla 6.3.9. Ensayos químicos. DIT14-1001.

6.3.6 Características de compactación y capacidad portante

6.3.6.1 Introducción

La compactación de los suelos es un procedimiento importantísimo como medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos. En 1933 cuando Proctor publicó sus investigaciones se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación (Moralejo, 2011).

A la abscisa y ordenada de este punto máximo se les denomina humedad óptima w_o , y densidad máxima, γ_{max} , respectivamente.

Los ensayos Proctor realizados sirven para determinar la humedad que debe tener el suelo para conseguir su mayor densidad a la hora de ejecutar el terraplén.

6.3.6.2 DIT14-201. Variante de Alcoy

Se ha realizado el ensayo Proctor Modificado por la norma UNE 103-501-94. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 6.3.10.

	D.máxima (g/cm ³)	H. óptima (%)
Nº de muestras	4	4
Valor máximo	1.87	19.3
Valor mínimo	1.77	15.2
Media	1.82	17.1
Desviación típica	0.043	1.68
Coefficiente de variación	2.35	9.82

Tabla 6.3.10. Resultados del ensayo Proctor Modificado. DIT14-201.

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

Se han realizado 4 ensayos Proctor Modificado con un resultado de densidad máxima con valores comprendidos entre 1.77 g/cm^3 y 1.87 g/cm^3 y una media de 1.82 g/cm^3 . La humedad óptima obtenida está dentro del intervalo de 19.3 % como valor máximo y 15.2 % como valor mínimo siendo 17.1 % el valor medio.

También se han realizado varios ensayos CBR. El ensayo CBR (California Bearing Ratio) mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada de suelo después de haberla sumergido en agua durante cuatro días y de haber medido su hinchamiento.

Los resultados de los ensayos CBR nos sirven para poder clasificar el material para su posterior uso. Los resultados del ensayo para el proyecto de la Variante de Alcoy se muestran en la Tabla 6.3.11.

	Índice al 100 %	Hinchamiento (%)
Nº de muestras	4	4
Valor máximo	12.3	3.71
Valor mínimo	4.4	1.62
Media	7.35	2.52
Desviación típica	3.47	0.94
Coefficiente de variación	47.16 %	37.52 %

Tabla 6.3.11. Resultados ensayos CBR.

6.3.6.3 DIT14-601. Variante de Montaberner

Se ha realizado el ensayo Proctor Modificado por la norma UNE 103-501-94. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 6.3.12.

Se han realizado 3 ensayos Proctor Modificado con un resultado de densidad máxima con valores comprendidos entre 1.39 g/cm^3 y 1.51 g/cm^3 y una media de 1.45 g/cm^3 . La humedad óptima obtenida está dentro del intervalo de 28.0 % como valor máximo y 22.0 % como valor mínimo siendo 25.03 % el valor medio.

	D.máxima (g/cm^3)	H. óptima (%)
Nº de muestras	3	3
Valor máximo	1.51	28.0
Valor mínimo	1.39	22.0
Media	1.45	25.0
Desviación típica	0.06	3.00
Coefficiente de variación	4.17	11.99

Tabla 6.3.12. Resultados del ensayo Proctor Modificado. DIT14-601.

Del ensayo CBR únicamente contamos con un resultado de un ensayo realizado con material de las Facies Tap y es un Índice CBR (100%) de 55.

6.3.6.4 DIT14-1001. Variante de Benisa

Se ha realizado el ensayo Proctor Modificado por la norma UNE 103-501-94. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 6.3.13.

Se han realizado 9 ensayos Proctor Modificado con un resultado de densidad máxima con valores comprendidos entre 1.44 g/cm³ y 1.83 g/cm³ y una media de 1.65 g/cm³. La humedad óptima obtenida está dentro del intervalo de 23.0 % como valor máximo y 14.1 % como valor mínimo siendo 17.3 % el valor medio.

	D.máxima (g/cm ³)	H. óptima (%)
Nº de muestras	9	9
Valor máximo	1.83	23
Valor mínimo	1.44	14.1
Media	1.65	17.3
Desviación típica	0.1153	3.0068
Coefficiente de variación	6.99 %	17.37 %

Tabla 6.3.13. Resultados del ensayo Proctor Modificado. DIT14-1001.

Los resultados del ensayo CBR con índice al 95 % y al 100 % se muestran en la Tabla 6.3.14.

	CBR 95 %	CBR 100 %
Nº de muestras	9	9
Valor máximo	15	23
Valor mínimo	2	4
Media	6.2	9.2
Desviación típica	3.87	5.52
Coefficiente de variación	62.13 %	59.83 %

Tabla 6.3.14. Resultados del ensayo CBR. DIT14-1001.

6.3.7 Aprovechamiento de materiales

El PG-3 (Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes) especifica una serie de condiciones que deben cumplir los materiales para su empleo en la ejecución de los diferentes elementos de las obras viarias.

Teniendo en cuenta esas especificaciones se han determinado los posibles usos de los materiales margosos en Facies "Tap" objeto de estudio en el presente documento.

Así, en dicho Pliego dice que los rellenos tipo terraplén estarán constituidos por materiales que cumplan alguna de las dos condiciones granulométricas siguientes:

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

- Cernido, o material que pasa, por el tamiz 20 UNE mayor del 70 por 100 ($\# 20 > 70 \%$), según UNE 103101.
- Cernido o material que pasa, por el tamiz 0.080 UNE mayor o igual del treinta y cinco por ciento ($\# 0.080 > 35 \%$), según UNE 103101.

Los materiales estudiados cumplen en el 100 % de las muestras ambas condiciones.

En los rellenos tipo terraplén se distinguirán las cuatro zonas siguientes, cuya geometría se definirá en el Proyecto:

- Coronación: Es la parte superior del relleno tipo terraplén, sobre la que se apoya el firme, con un espesor mínimo de dos tongadas y siempre mayor de cincuenta centímetros (50 cm).
- Núcleo: Es la parte del relleno tipo terraplén comprendida entre el cimientado y la coronación.
- Espaldón: Es la parte exterior del relleno tipo terraplén que, ocasionalmente, constituirá o formará parte de los taludes del mismo. No se considerarán parte del espaldón los revestimientos sin misión estructural en el relleno entre los que se consideran, plantaciones, cubierta de tierra vegetal, encachados, protecciones antierosión, etc.
- Cimientado: Es la parte inferior del terraplén en contacto con la superficie de apoyo. Su espesor será como mínimo de un metro (1 m).

Cada parte del relleno admite un tipo de material determinado. Para acotar esas características el PG-3 clasifica los materiales en función de unas especificaciones.

Desde el punto de vista de sus características intrínsecas los materiales se clasificarán en los tipos siguientes:

- Suelos seleccionados. Se considerarán como tales aquellos que cumplen las siguientes condiciones:
 - Contenido en materia orgánica inferior al cinco por ciento ($MO < 0.2 \%$) según UNE 103204.
 - Contenido en sales solubles en agua, incluido el yeso, inferior al cinco por ciento ($SS < 0.2 \%$), según NLT 114.
 - Tamaño máximo no superior a cien milímetros ($D_{max} < 100 \text{ mm}$).
 - Cernido por el tamiz 0.40 UNE menor o igual que el quince por ciento ($\# 0.40 \leq 15 \%$) o que en el caso contrario cumpla todas y cada una de las condiciones siguientes:
 - Cernido por el tamiz 2 UNE, menor del ochenta por ciento ($\# 2 < 80 \%$).
 - Cernido por el tamiz 0.40 UNE, menor del setenta y cinco por ciento ($\# 0.40 < 75 \%$).
 - Cernido por el tamiz 0.080 UNE inferior al veinticinco por ciento ($\# 0.080 < 25 \%$).
 - Límite líquido menor de treinta ($LL < 30$), según UNE 103103.
 - Índice de plasticidad menor de diez ($IP < 10$), según UNE 103103 y UNE 103104.

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

- Suelos adecuados. Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados cumplan las condiciones siguientes:
 - Contenido en materia orgánica inferior al uno por ciento ($MO < 1\%$), según UNE 103204.
 - Contenido en sales solubles, incluido el yeso, inferior al cero con dos por ciento ($SS < 0.2\%$), según NLT 114.
 - Tamaño máximo no superior a cien milímetros ($D_{max} < 100 \text{ mm}$).
 - Cernido por el tamiz 2 UNE, menor del ochenta por ciento ($\# 2 < 80\%$).
 - Cernido por el tamiz 0.080 UNE inferior al treinta y cinco por ciento ($\# 0.080 < 35\%$).
 - Límite líquido inferior a cuarenta ($LL < 40$), según UNE 103103.
 - Si el límite líquido es superior a treinta ($LL > 30$) el índice de plasticidad será superior a cuatro ($IP > 4$), según UNE 103103 y UNE 103104.

- Suelos tolerables. Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados ni adecuados, cumplen las condiciones siguientes:
 - Contenido en materia orgánica inferior al dos por ciento ($MO < 2\%$), según UNE 103204.
 - Contenido en yeso inferior al cinco por ciento ($\text{yeso} < 5\%$), según NLT 115.
 - Contenido en otras sales solubles distintas del yeso inferior al uno por ciento ($SS < 1\%$), según NLT 114.
 - Límite líquido inferior a sesenta y cinco ($LL < 65$), según UNE 103103.
 - Si el límite líquido es superior a cuarenta ($LL > 40$) el índice de plasticidad será mayor del setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido ($IP > 0.73 (LL - 20)$).
 - Asiento en ensayo de colapso inferior al uno por ciento (1%), según NLT 254, para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500, y presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0.2 MPa).
 - Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al tres por ciento (3%), para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500.

- Suelos marginales. Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados, ni adecuados, ni tampoco como suelos tolerables, por el incumplimiento de alguna de las condiciones indicadas para éstos, cumplan las siguientes condiciones:
 - Contenido en materia orgánica inferior al cinco por ciento ($MO < 5\%$), según UNE 103204.
 - Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al cinco por ciento (5%), para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500.
 - Si el límite líquido es superior a noventa ($LL > 90$) el índice de plasticidad será inferior al setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido ($IP < 0.73 (LL - 20)$).

- Suelos inadecuados. Se considerarán suelos inadecuados:
 - Los que no se puedan incluir en las categorías anteriores.

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

- Las turbas y otros suelos que contengan materiales perecederos u orgánicos tales como tocones, ramas, etc.
- Los que puedan resultar insalubres para las actividades que sobre los mismos se desarrollen.

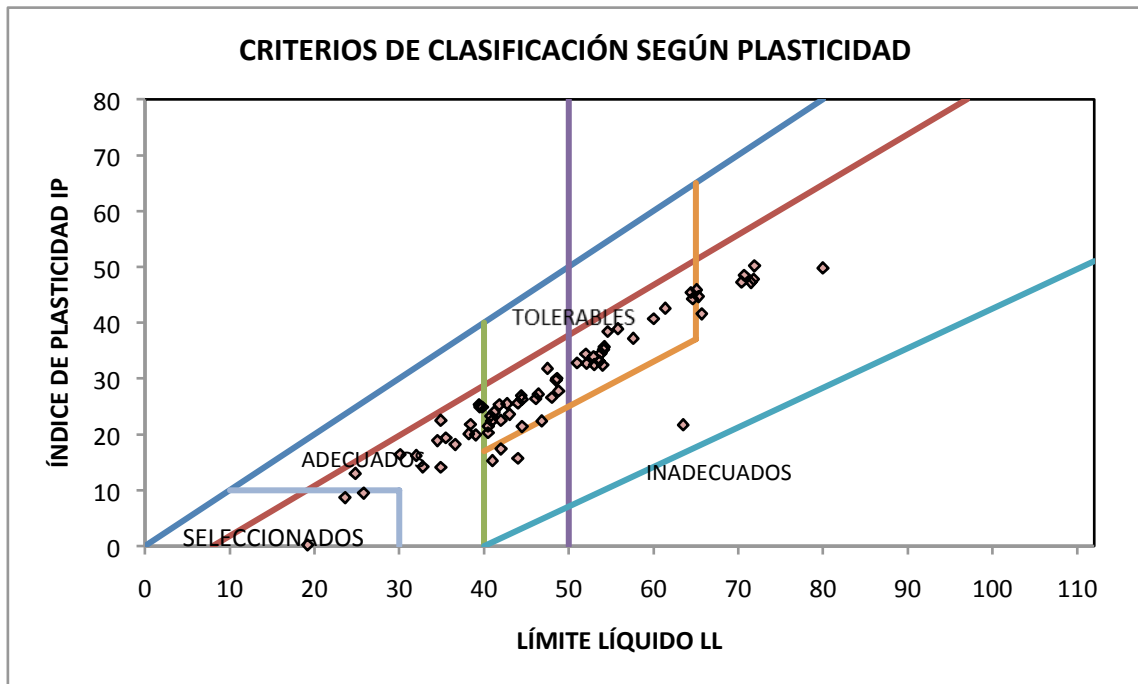


Figura 6.3.17. Criterios de clasificación según plasticidad. DIT14-201.

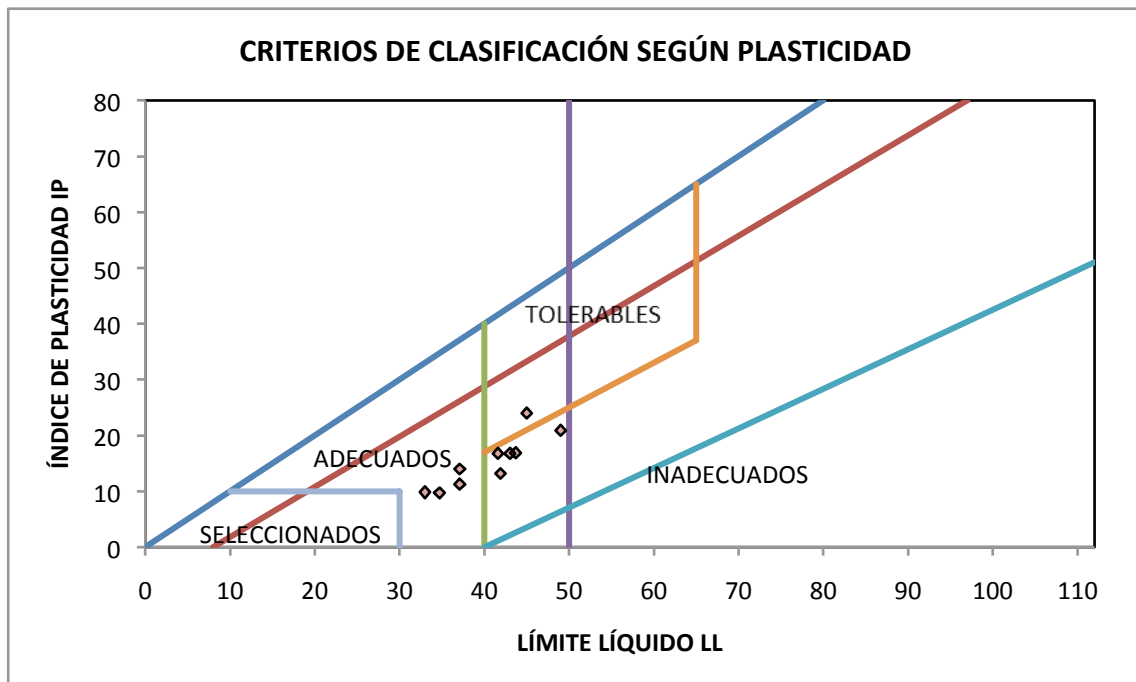


Figura 6.3.18. Criterios de clasificación según plasticidad. DIT14-601.

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

Las Figuras 6.3.17 a 6.3.19 clasifican los resultados obtenidos en los proyectos constructivos en seleccionados, adecuados, tolerables e inadecuados, proporcionando una información muy útil sobre la conveniencia o no de la utilización de este material en terraplenes.

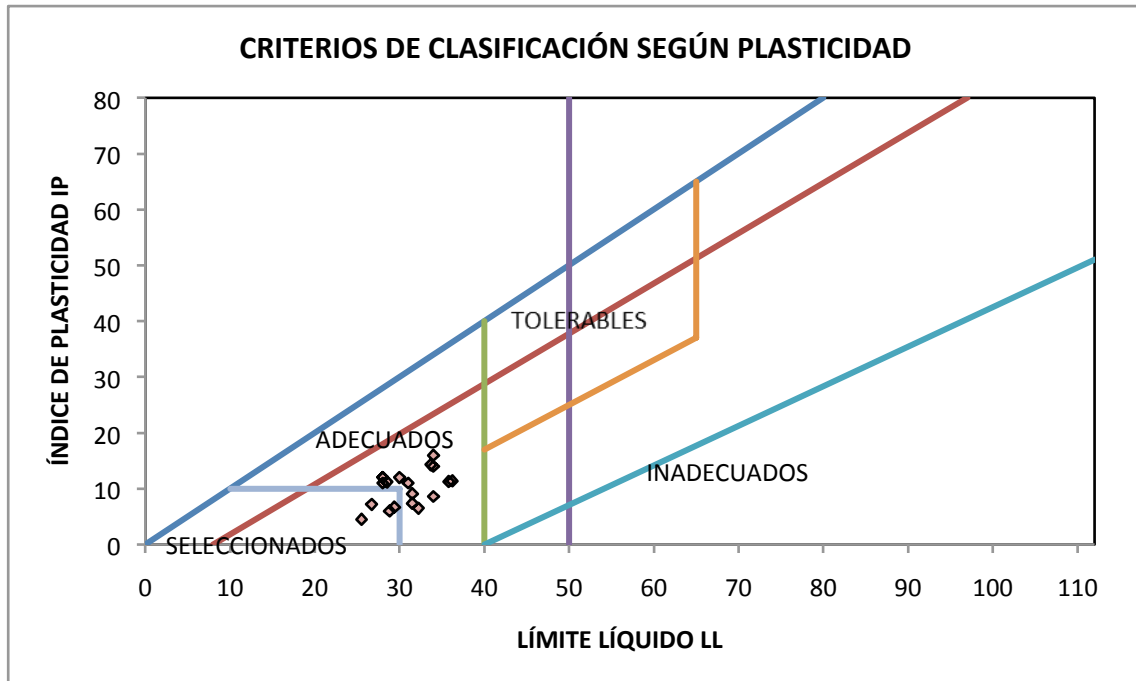


Figura 6.3.19. Criterios de clasificación según plasticidad. DIT14-1001.

6.4. PARÁMETROS DE ESTADO EN SUELOS

6.4.1 Generalidades

Los parámetros de estado son aquellos que definen el estado de agregación o compacidad de un suelo. Los suelos, por su constitución, forman un sistema trifásico compuesto normalmente por los siguientes componentes:

- Parte sólida formada por los granos y partículas superficiales.
- Una parte vacía rellena del aire que ocupa los huecos que dejan entre sí las partículas.
- Una parte líquida formada por el agua que puede llenar, parcial o totalmente, los huecos vacíos.

El estado de compacidad de un suelo se define mediante unas relaciones entre volúmenes y pesos de estos elementos constitutivos.

Los parámetros de estado de los que se disponen datos son la humedad ($W\%$) y la densidad seca o peso específico seco (γ_d en g/cm^3).

La densidad seca se determina mediante el ensayo definido en la Norma UNE 103-301/94. El peso específico seco se define como el peso específico, descontando el peso del agua, es decir, el peso específico aparente que tendría el suelo si extrajéramos su agua sin modificar su volumen total:

$$\gamma_d = W_s V_t$$

6.4.2 DIT14-201: Variante de Alcoy

En el proyecto de la Variante de Alcoy se disponen de datos de peso específico seco: el rango de variación del peso específico seco es 1.39 g/cm^3 a 2.00 g/cm^3 siendo la media 1.75 g/cm^3 y el coeficiente de variación del 8.13% , tal y como se muestra en la Tabla 6.4.1.

Nº de muestras	53
Valor máximo	2.00
Valor mínimo	1.39
Media	1.75
Desviación típica	0.14
Coefficiente de variación	8.13 %

Tabla 6.4.1. Resultados densidad seca (g/cm^3).

En el estudio de la relación de la densidad seca con la profundidad (Figura 6.4.1) se puede observar que la formación es muy homogénea en todo el espesor estudiado, no variando apenas su densidad con la profundidad.

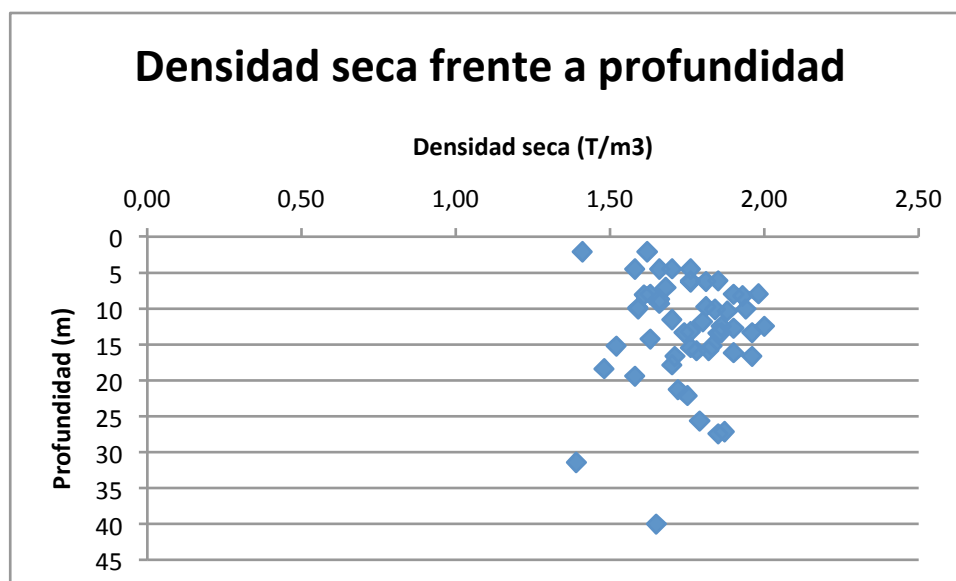


Figura 6.4.1. Relación entre la densidad seca y la profundidad.

La humedad natural se ha determinado mediante el ensayo correspondiente definido en la norma UNE 103-300/93. La humedad se define como el cociente de pesos de agua y sólidos:

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

Se disponen datos de humedad en el proyecto de la Variante de Alcoy: la humedad máxima y mínima de las muestras analizadas ha dado como resultado 29.1 % Y 2.6 % respectivamente siendo la media 17.3 % y el coeficiente de variación del 24.96 % (Tabla 6.4.2).

Nº de muestras	103
Valor máximo	29.1
Valor mínimo	2.6
Media	17.3
Desviación típica	4.32
Coeficiente de variación	24.96 %

Tabla 6.4.2. Valores de humedad natural. DIT14-201.

En la Figura 6.4.2 se observa que la mayoría de muestras tiene una humedad natural entre el 10 y el 20 %.

Además también se ha estudiado la relación entre la w_{nat} y la profundidad en la Figura 6.4.3, donde puede verse que no aparece una relación aparente entre la humedad natural y la profundidad.

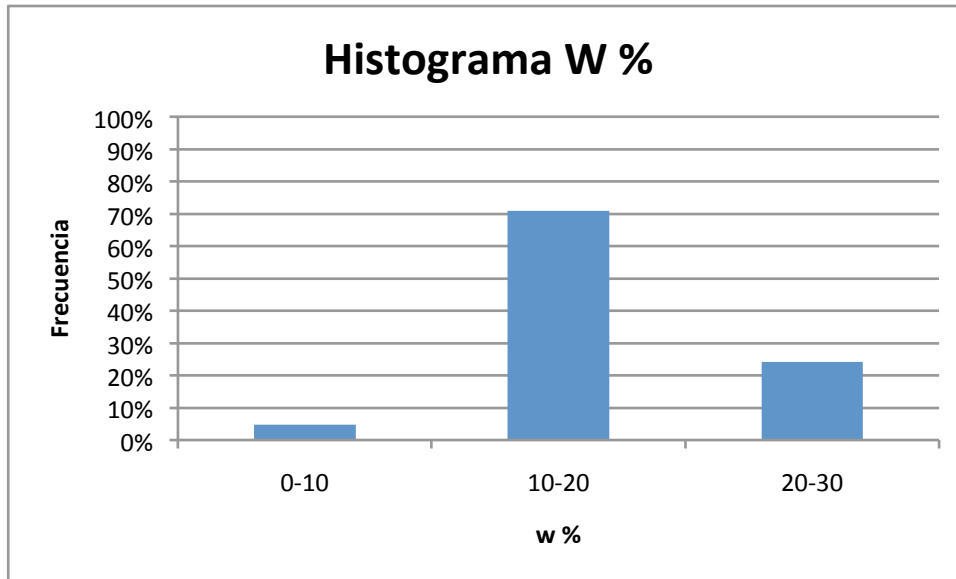


Figura 6.4.2. Histograma de la humedad natural

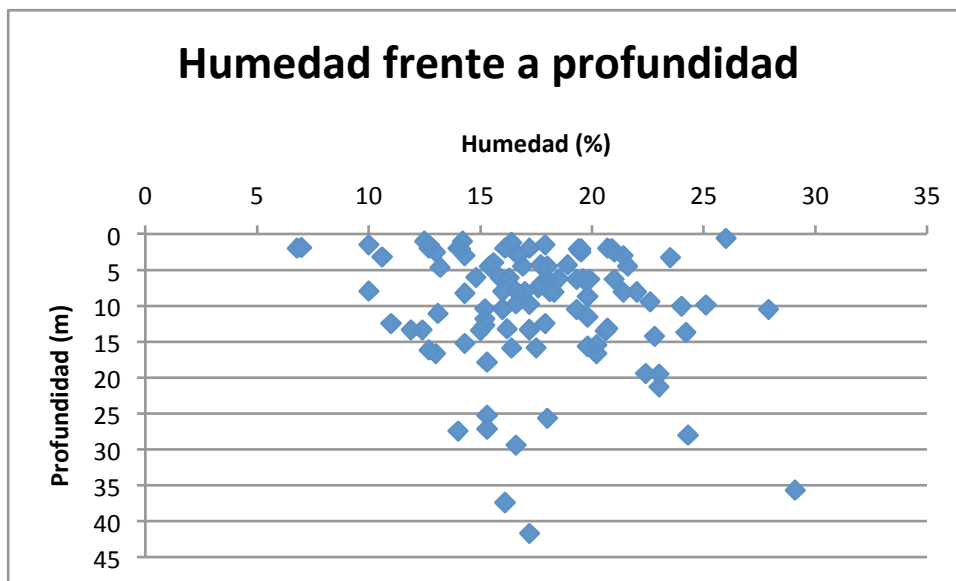


Figura 6.4.3. Relación entre la humedad y la profundidad. DIT14-201.

A partir de los datos de humedad y plasticidad se ha obtenido el índice de Fluidez o Índice de consistencia. La consistencia de un suelo con características plásticas, depende del valor de su humedad natural y de la relación entre este valor y sus límites líquido y plástico. Si la humedad está por encima del valor del límite líquido la consistencia de este suelo es de líquido viscoso, mientras que tendrá una consistencia de sólido plástico si la humedad se encuentra entre ambos límites, y una de sólido frágil si dicha humedad se encuentra por debajo del límite plástico.

Una forma de indicar directamente la consistencia de un suelo es mediante el parámetro denominado índice de fluidez, que se define por la siguiente expresión:

$$IF = W - L.P.I.P$$

- Si el suelo tiene la humedad natural inferior al límite plástico (comportamiento como sólido frágil), el índice de fluidez es negativo $0 < I_f$.
- Si el suelo tiene la humedad natural entre el límite plástico y el líquido (comportamiento como sólido plástico), el índice de fluidez resulta ser $0 < I_f < 1$.
- Si el suelo tiene la humedad natural superior al límite líquido (comportamiento como fluido viscoso), el índice de fluidez es $1 > I_f$.

Se ha determinado el histograma del Índice de Fluidez de todas las muestras disponibles (Figura 6.4.4). La mayor parte de las muestras tienen un Índice de Fluidez menor a 0 y por lo tanto se comportan como un sólido frágil. El resto tienen un Índice de Fluidez entre 0 y 1 y por tanto se comportan como un sólido plástico. En ningún caso se ha obtenido un Índice de Fluidez superior a la unidad (comportamiento como fluido viscoso).

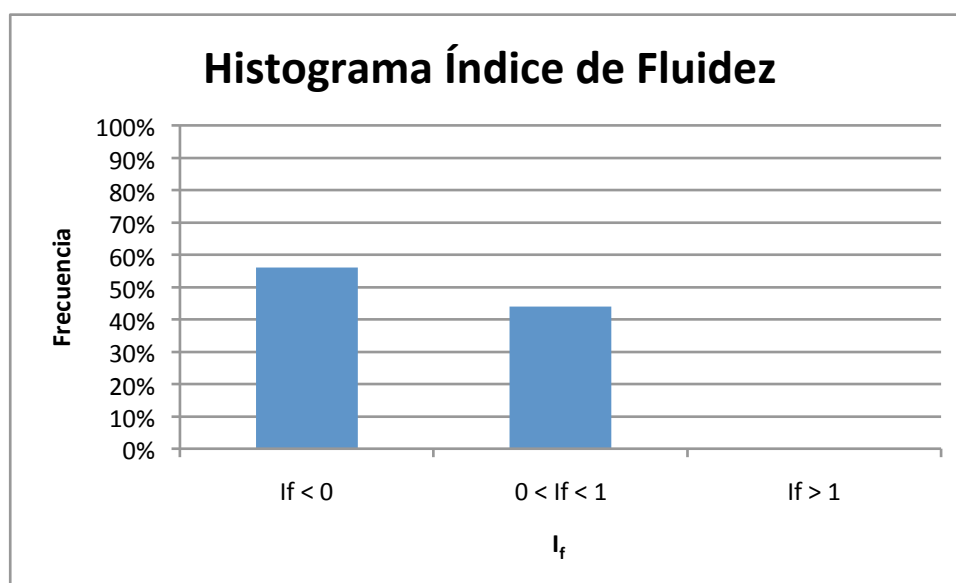


Figura 6.4.4. Histograma del índice de fluidez.

6.4.3 DIT14-601: Variante de Montaberner

En el proyecto de la Variante de Montaberner se dispone de datos de peso específico seco: el rango de variación del peso específico seco es 1.72 g/cm^3 a 2.60 g/cm^3 siendo la media 2.00 g/cm^3 y el coeficiente de variación del 15.64 %, tal y como se muestra en la Tabla 6.4.3.

Por su parte, la relación de la densidad seca frente a la profundidad se muestra en la Figura 6.4.5.

Cabe comentar que además se disponen de datos de humedad en el proyecto de la Variante de Montaberner: la humedad máxima y mínima de las muestras analizadas ha dado como resultado 29.1 % y 2.6 % respectivamente siendo la media 17.3 % y el coeficiente de variación del 25 % (Tabla 6.4.4).

Nº de muestras	6
Valor máximo	2.60
Valor mínimo	1.72
Media	2.00
Desviación típica	0.31
Coefficiente de variación	15.64 %

Tabla 6.4.3. Peso específico seco (g/cm³). DIT14-601.

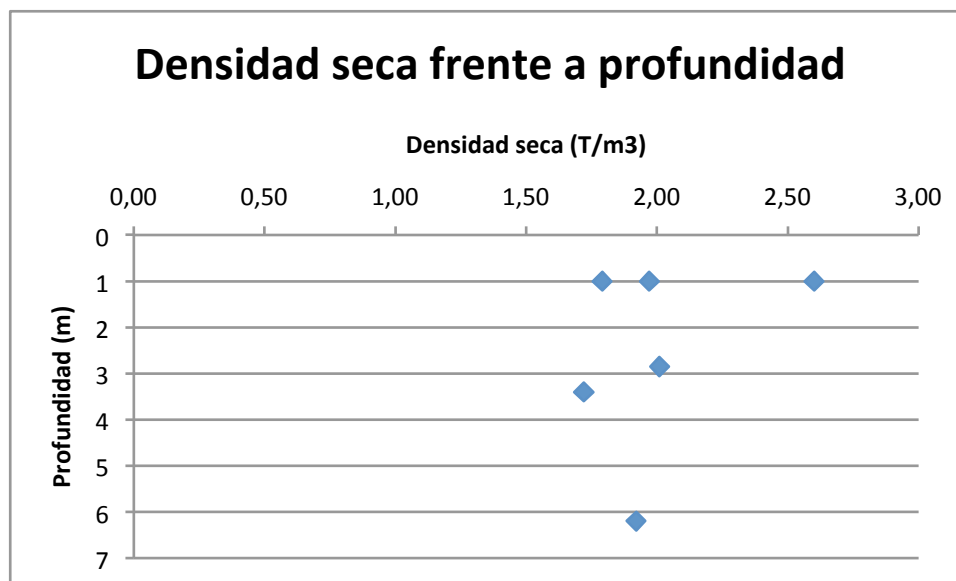


Figura 6.4.5. Relación entre la densidad seca y la profundidad. DIT14-601.

Nº de muestras	3
Valor máximo	16.3
Valor mínimo	7.7
Media	12.8
Desviación típica	4.54
Coefficiente de variación	35.34 %

Tabla 6.4.4. Resultados del ensayo de humedad (%). DIT14-601.

En la Figura 6.4.6 se observa que la mayoría de muestras tiene una humedad natural entre el 10 y el 20 % y en la Figura 6.4.7 se puede apreciar que no aparece una relación aparente entre la humedad natural y la profundidad.

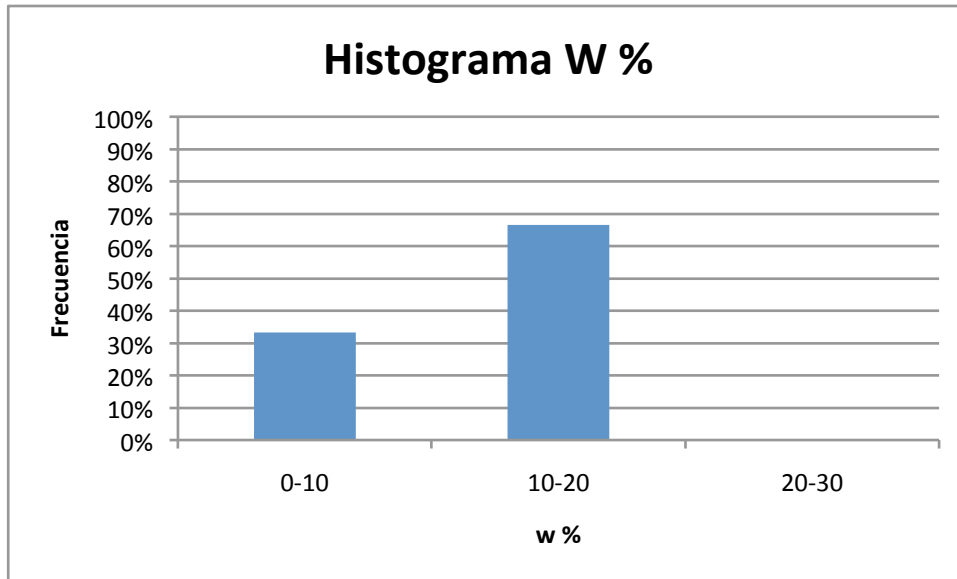


Figura 6.4.6. Histograma de humedad natural. DIT14-601.

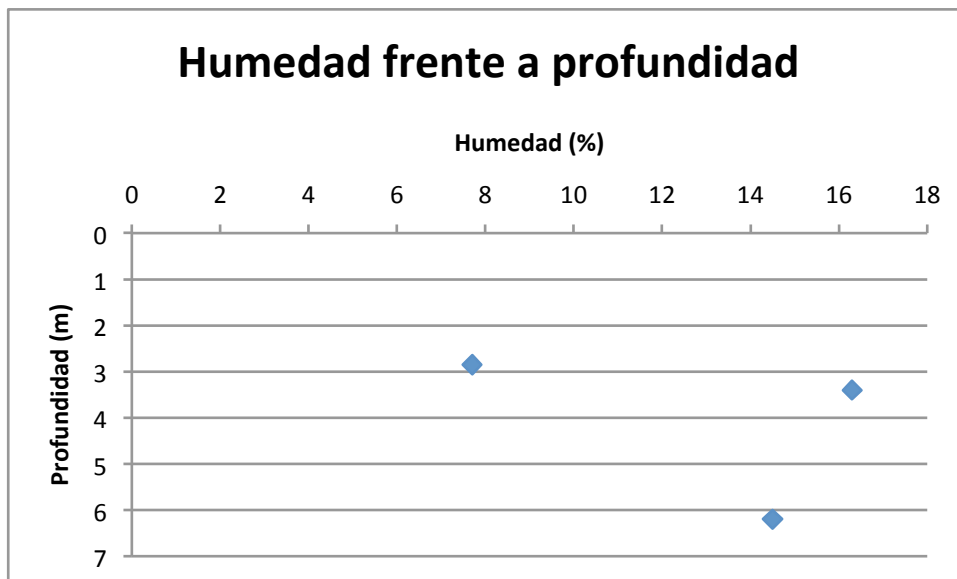


Figura 6.4.7. Humedad frente a profundidad. DIT14-601.

La totalidad de las muestras tienen un Índice de Fluidez menor a 0 y por tanto su comportamiento es como el de un sólido frágil (Figura 6.4.8).

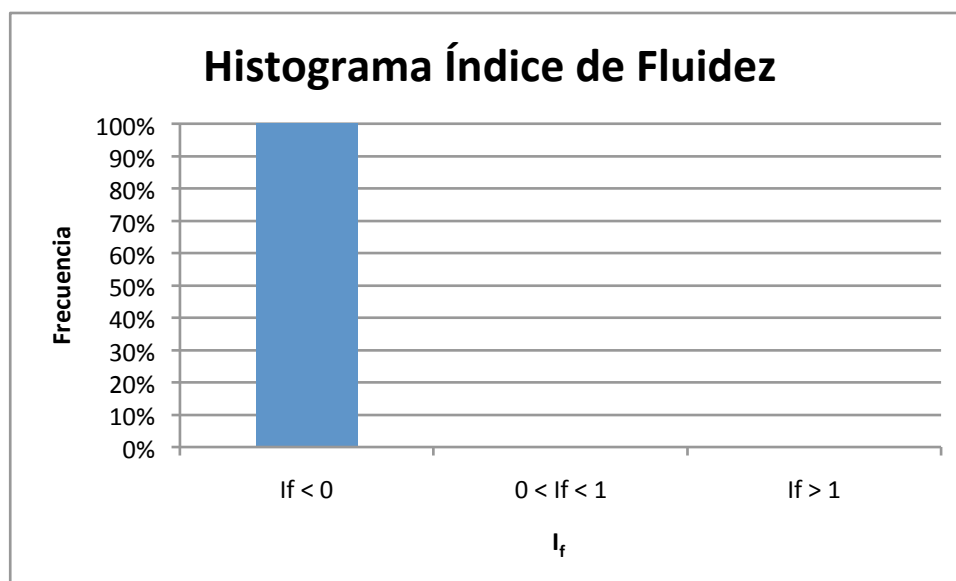


Figura 6.4.8. Índice de Fluidez. DIT14-601.

6.4.4 DIT14-1001: Variante de Benisa

En el proyecto de la Variante de Benisa se dispone de datos de peso específico seco: el rango de variación del peso específico seco es 1.55 g/cm^3 a 2.63 g/cm^3 siendo la media 2.23 g/cm^3 y el coeficiente de variación del 14.57 %, tal y como se muestra en la Tabla 6.4.5.

Nº de muestras	23
Valor máximo	2.63
Valor mínimo	1.55
Media	2.23
Desviación típica	0.33
Coefficiente de variación	14.57 %

Tabla 6.4.5. Peso específico seco (g/cm^3). DIT14-1001.

La relación de la densidad seca frente a la profundidad se muestra en la Figura 6.4.9. Se observa que los valores superiores de densidad seca se obtienen de las muestras extraídas a mayor profundidad.

Se disponen datos de humedad en el proyecto de la Variante de Benisa: la humedad máxima y mínima de las muestras analizadas ha dado como resultado 30.8 % y 0.4 % respectivamente siendo la media 7.68 % y el coeficiente de variación del 107.68 % (Tabla 6.4.6), valores que indican una alta variabilidad en los resultados de dicho ensayo, y una humedad natural baja en general.

En la Figura 6.4.10 se observa que la mayoría de muestras tiene una humedad natural entre el 0 y el 10 %, mientras que el resto se mueven en el intervalo de entre 10 y 20 % de humedad, habiendo un dato anómalo superior al 30 %.

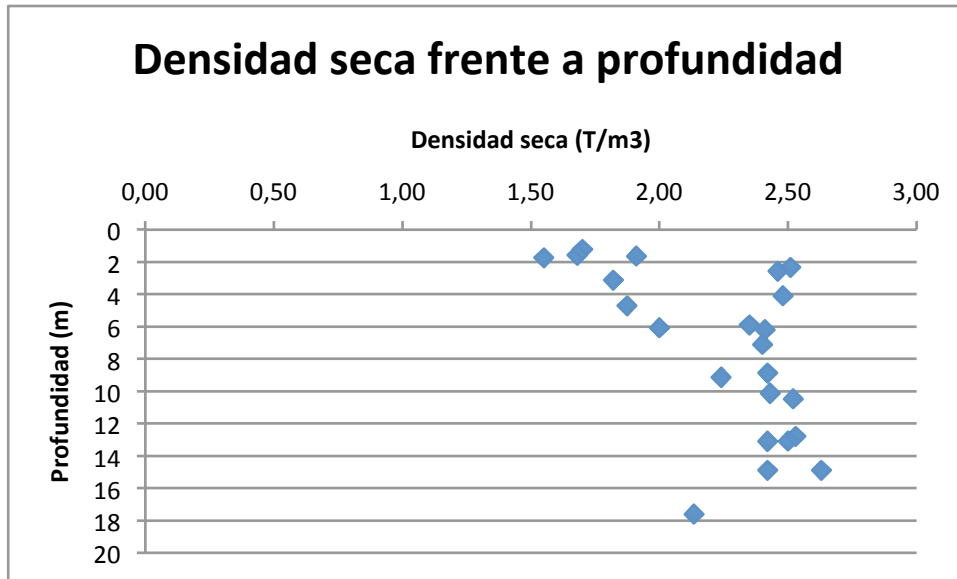


Figura 6.4.9. Densidad seca frente a profundidad. DIT14-1001.

Nº de muestras	23
Valor máximo	30.8
Valor mínimo	0.4
Media	7.68
Desviación típica	8.27
Coefficiente de variación	107.68 %

Tabla 6.4.6. Resultados del ensayo de humedad (%). DIT14-1001.

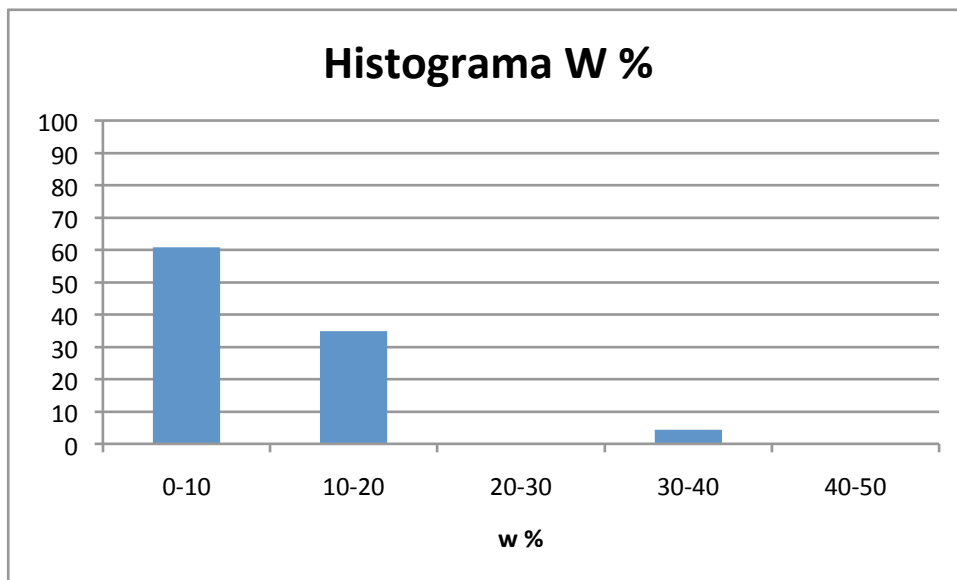


Figura 6.4.10. Histograma de la humedad natural. DIT14-1001.

En la Figura 6.4.11 se observa que las muestras extraídas a mayor profundidad presentan una humedad natural muy baja.

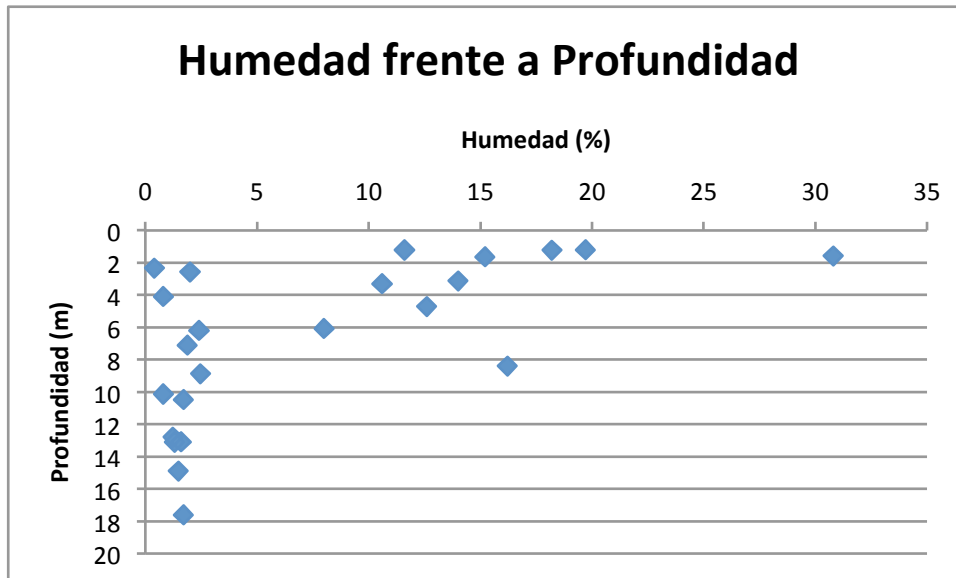


Figura 6.4.11. Relación entre la humedad natural y la profundidad. DIT14-1001.

La mayor parte de las muestras ensayadas tienen un Índice de Fluidez inferior a 0 y por tanto su comportamiento es el de un sólido frágil (Figura 6.4.12). El resto de muestras se dividen a partes iguales entre las que tienen un Índice de Fluidez comprendido entre 0 y 1 (comportamiento de sólido plástico) y las que tienen un Índice de Fluidez superior a 1 (comportamiento de fluido viscoso).

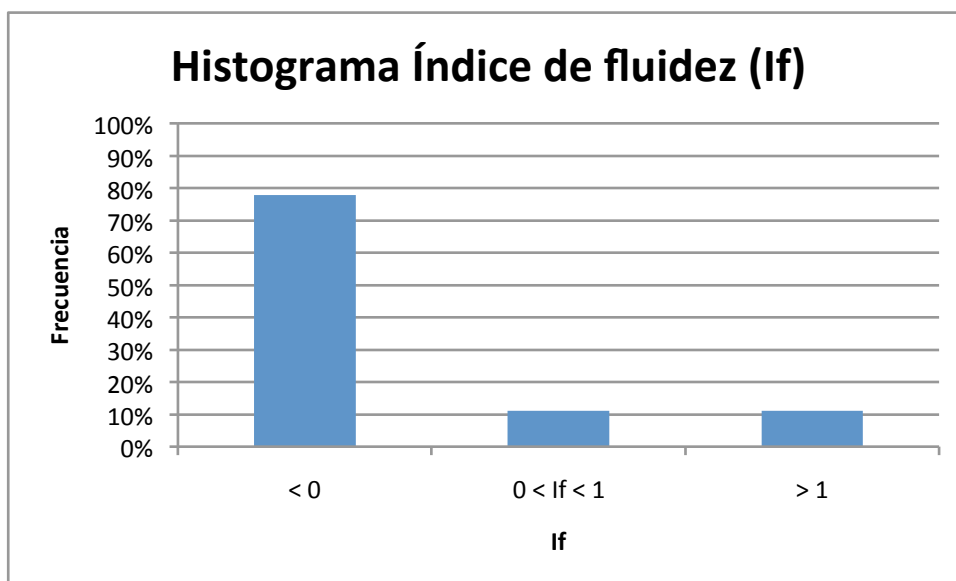


Figura 6.4.12. Histograma del Índice de fluidez. DIT14-1001.

6.5. PARÁMETROS RESISTENTES

6.5.1 Generalidades

Al modificar el estado tensional del suelo se producen deformaciones que pueden originar su rotura. Aunque los suelos con cohesión rompen a veces por tracción, como puede ser el caso de las grietas verticales que a veces se observan en la coronación de un talud deslizado, la forma de rotura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

La resistencia se caracteriza con procedimientos y parámetros acordes al tipo de terreno en cuestión y al método de cálculo que se va a emplear. En general, para cualquier tipo de suelo se considera adecuado el uso del modelo de Mohr-Coulomb, caracterizando su resistencia con los valores efectivos del ángulo de rozamiento interno y la cohesión; deberá disponerse de valores para situaciones con drenaje (valores efectivos φ' , c') y sin drenaje (φ_u y c_u).

La resistencia al corte del suelo no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, etc., así como, muy especialmente, de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (agua o agua y aire).

Como se ha dicho antes el criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb, que relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier plano del suelo. Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

$$\tau = c' + \sigma - u \cdot \tan \varphi'$$

donde

τ = resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano

σ = tensión total normal actuando sobre el mismo plano

u = presión intersticial

c' = cohesión efectiva

φ' = ángulo de rozamiento efectivo.

La ecuación anterior representa una recta en el espacio (σ' , τ) que a menudo se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo. Esta línea proporciona, para cada valor de la tensión efectiva normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano.

Para la determinación de los parámetros resistentes del modelo de Mohr Coulomb de los materiales de esta formación se dispone de ensayos de corte directo en suelos y de compresiones simples.

En el caso del corte directo y/o triaxial solo contamos con datos de los Proyectos de la Variante de Alcoy y de la Variante de Montaberner.

6.5.2 Ensayo de corte directo / triaxial

6.5.2.1 DIT14-201: Variante de Alcoy

Se dispone de dos ensayos de corte directo tipo CD (consolidación y drenado) y de tres ensayos triaxiales. El ensayo de corte directo consiste en colocar la muestra en una caja de corte directo, aplicando un esfuerzo normal determinado, humedeciendo o drenando la muestra de ensayo, o ambas cosas, consolidando la muestra bajo el esfuerzo normal, soltando los marcos que contiene la muestra y desplazando un marco horizontalmente respecto al otro a una velocidad constante de deformación y medir la fuerza de corte y los desplazamientos horizontales a medida que la muestra es llevada a la rotura. A partir de los resultados se determina el ángulo de rozamiento interno φ' y la cohesión efectiva c' (Moralejo, 2011). El ensayo triaxial obtiene los mismos parámetros que el de corte directo pero con una importante diferencia, que es la de la medida de presiones intersticiales, que en el ensayo de corte directo, no puede realizarse, por lo que no se puede establecer con exactitud, sino solo cualitativamente la magnitud de las presiones intersticiales y por tanto tampoco puede fijarse con exactitud las presiones efectivas; aunque puede obtenerse una aproximación comparando densidades, humedades y grado de saturación entre la probeta antes y después del ensayo (Morilla, 2012).

Los datos obtenidos en el proyecto de la Variante de Alcoy son los reflejados en la Tabla 6.5.1.

Sondeo	Muestra	c (kg/cm ²)	ϕ (°)	Ensayo
SED-1	TP-2	1.08	19.5	Corte Directo
SED-1	TP-5, TP-6 Y TP-7	0.23	32.7	Triaxial
SED-7	MI-5 Y MI-7	0.48	33.2	Triaxial
SED-7	MI-9	0.40	24.9	Corte Directo
SED-8	TP-7	0.54	32.7	Triaxial

Tabla 6.5.1. Valores de los parámetros resistentes obtenidos.

Las muestras tienen un ángulo de rozamiento entre 19.5° y 33.2° por lo que la variabilidad es bastante amplia, teniendo en cuenta que no se ha realizado un número muy elevado de ensayos.

Se observa a su vez que los valores obtenidos mediante el Ensayo Triaxial son más elevados que los obtenidos mediante el Ensayo de Corte Directo. Esto se debe a las diferentes condiciones de confinamiento de la muestra durante el ensayo.

Hay que comentar que la cohesión también tiene mucha variabilidad siendo el menor valor 0.23 kg/cm² y el mayor 1.08 kg/cm².

Se ha determinado el histograma y el tanto por ciento acumulado del ángulo de rozamiento efectivo (Figura 6.5.1) y de la cohesión efectiva (Figura 6.5.2) de los datos con los que contamos.

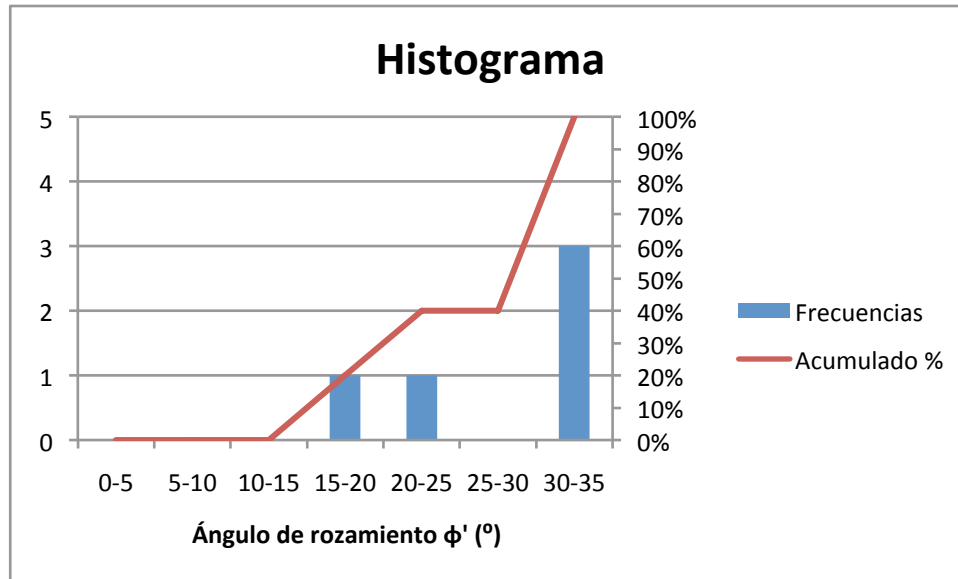


Figura 6.5.1. Histograma y % acumulado del ángulo de rozamiento interno.

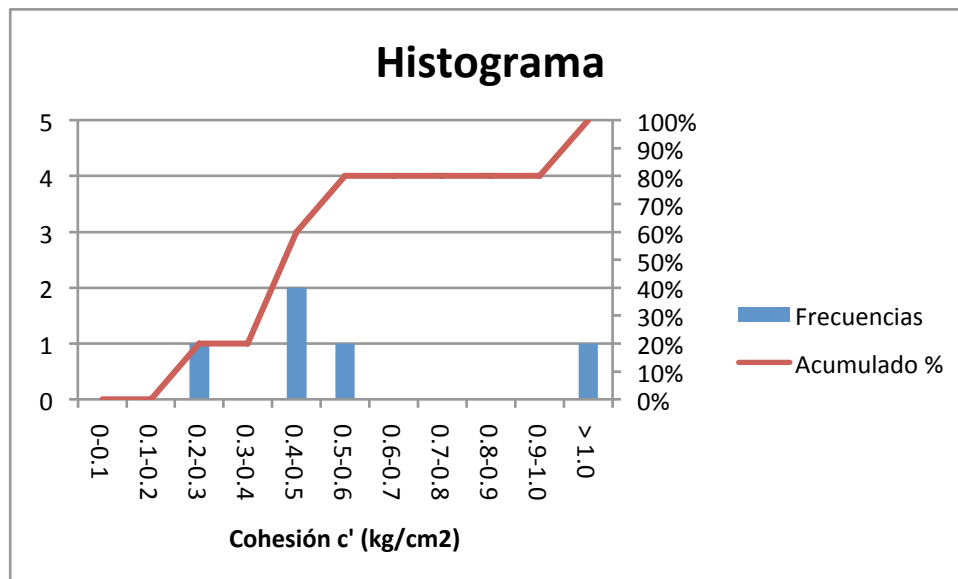


Figura 6.5.2. Histograma y % acumulado de la cohesión.

Se ha intentado determinar posibles correlaciones entre los parámetros del modelo de Mohr-Coulomb y la profundidad (Figura 6.5.3 y Figura 6.5.4).

El ángulo de rozamiento no depende en ninguna medida de la profundidad habiendo valores muy similares del ángulo de rozamiento para muy diferentes profundidades.

Entre la profundidad y la cohesión no puede determinarse una relación directa.

Por último hay que comentar que en el proyecto de la Variante de Alcoy no se dispone de datos de cohesión y ángulo de rozamiento residual.

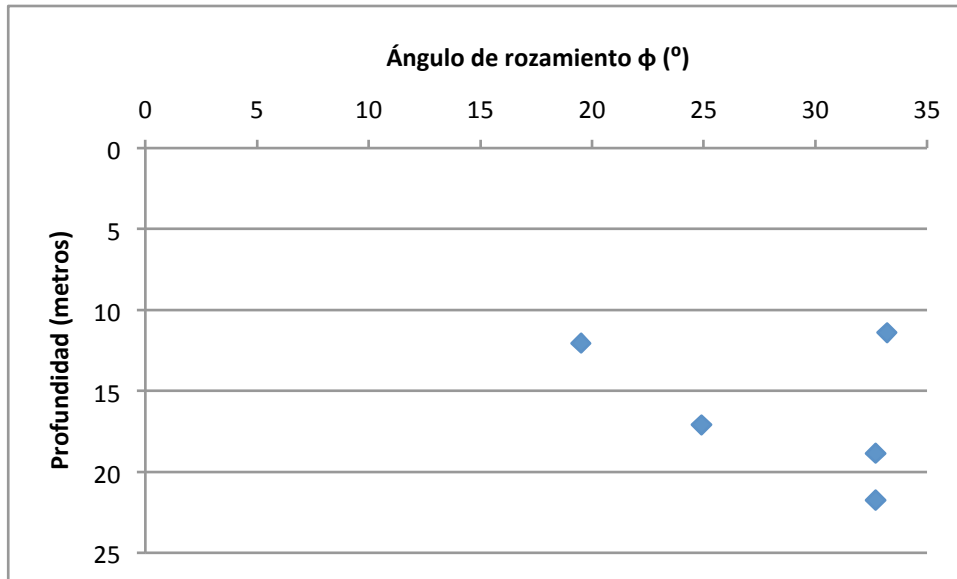


Figura 6.5.3. Relación entre el ángulo de rozamiento y la profundidad.

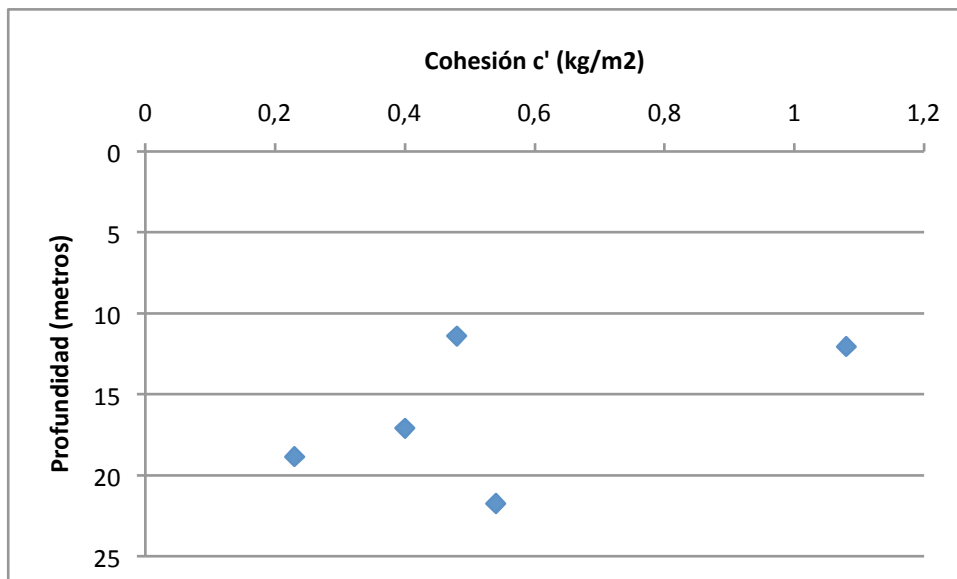


Figura 6.5.4. Relación entre la cohesión y la profundidad.

6.5.2.2 DIT14-601: Variante de Montaberner

Se dispone de un solo resultado del Ensayo de Corte Directo en suelo mioceno margoso, obteniéndose un resultado bastante elevado del ángulo de rozamiento para lo que es habitual en este tipo de materia (Tabla 6.5.2).

Sondeo	Muestra	c (kg/cm ²)	ϕ (°)	Ensayo
S-2	parafinada	1.7	50	Corte Directo

Tabla 6.5.2. Resultado del Ensayo de Corte Directo. DIT14-601.

6.5.3 Ensayo de resistencia a compresión simple

6.5.3.1 Introducción

El ensayo de compresión no confinada, también conocido con el nombre de ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial, es muy importante en Mecánica de Suelos y Rocas, ya que permite obtener un valor de carga última de los suelos cohesivos y rocas. En ocasiones se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un valor más preciso, ya que se entrega un resultado conservador. Este ensayo puede definirse en teoría como un caso particular del ensayo triaxial (Moralejo, 2011).

Este método de ensayo es aplicable sólo a rocas y materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. Los suelos granulares, los materiales laminados, los limos, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada.

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo o una roca a la compresión no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación y utilizando una muestra de suelo inalterada o roca tallada en forma de cilindro, generalmente con una relación alto/diámetro igual a 2.

En un ensayo de compresión simple se pueden producir distintos tipos de rotura (Figura 6.5.5), los cuales son la rotura frágil y la rotura dúctil.

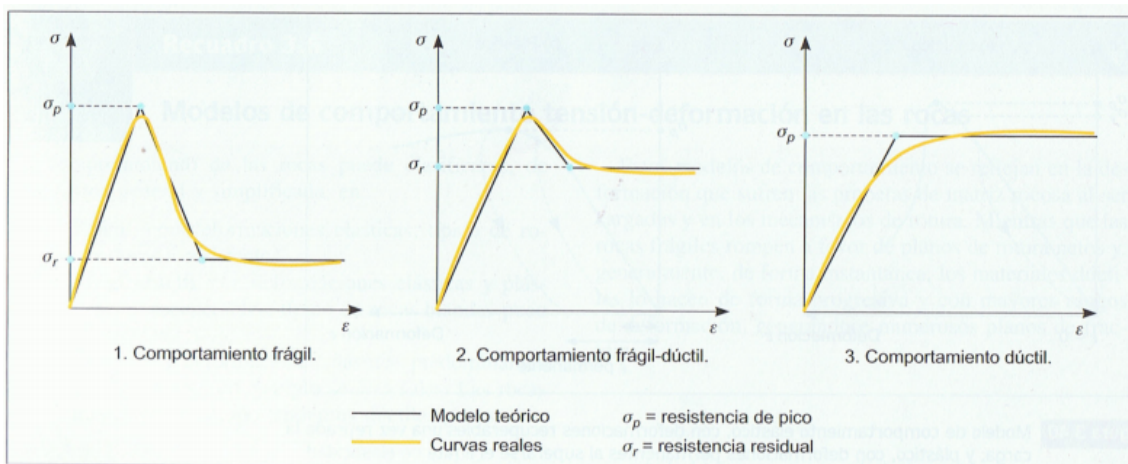


Figura 6.5.5. Modelos de comportamiento en rocas. Tomado de González de Vallejo (2002).

En la primera predominan las grietas paralelas a la dirección de la carga, y la rotura ocurre de un modo brusco y bajo deformaciones muy pequeñas, presentándose después de ella un desmoronamiento de la resistencia.

En la segunda la muestra se limita a deformarse, sin que aparezcan zonas de discontinuidad en ella. De forma intermedia, la rotura se produce a través de un plano inclinado, apareciendo un pico en la resistencia y un valor residual.

En las arcillas blandas aparece la rotura dúctil en el ensayo de compresión simple, mientras que en suelos cementados se suele registrar rotura frágil en este tipo de ensayos. Las teorías de rotura frágil fueron iniciadas por Alian Griffith en 1920, al atribuir la reducida resistencia a la tracción de muchos materiales a la presencia de diminutas fisuras en su interior, en cuyos extremos se produce concentración de tensiones. La rotura se produce debido a la propagación de las microfisuras existentes bajo dicha concentración de tensiones.

En una probeta sometida a compresión simple también se pueden producir tracciones locales en el contorno de las fisuras, especialmente sobre planos paralelos a la dirección de la compresión. Esto explica la aparición de grietas verticales. En suelos blandos sometidos a presiones no muy altas, la rotura dúctil se presenta bajo la forma de un ensanchamiento sólo por el centro, ya que por los extremos lo impide la fricción entre el suelo y las placas de carga.

Como resultado del ensayo se obtiene una curva tensión (σ) – deformación axial (ϵ). Dicha curva representa un máximo cuya ordenada es la máxima tensión axial que soporta la muestra, o lo que es lo mismo, la resistencia a la compresión simple (q_u) o resistencia uniaxial (σ_c); la abscisa es la deformación axial que ha producido en el proceso de carga hasta rotura (Figura 6.5.6).

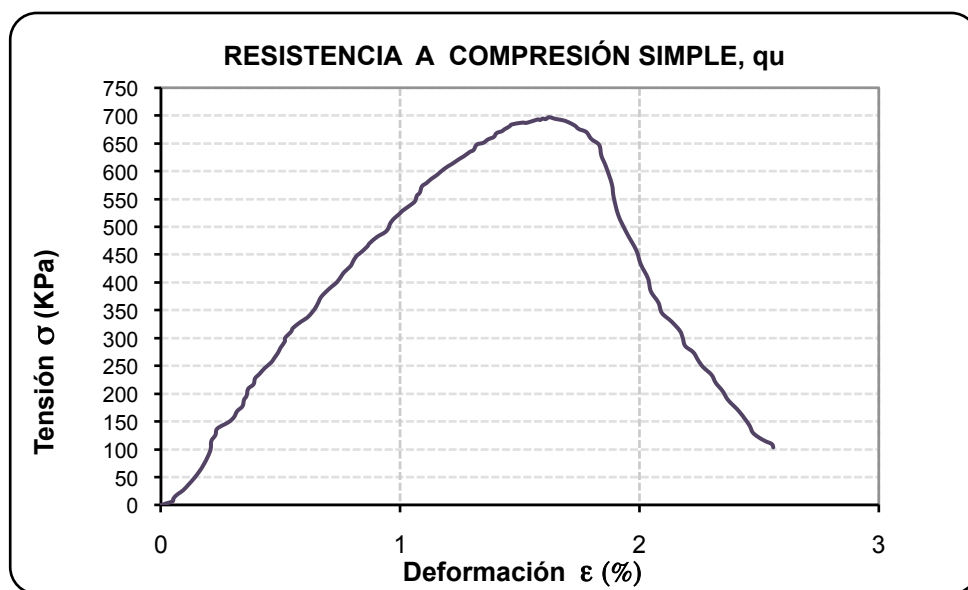


Figura 6.5.6. Gráfico del ensayo de compresión simple. Extraído de impreso de laboratorio.

6.5.3.2 DIT14-201: Variante de Alcoy

Se han realizado 51 ensayos para determinar la resistencia a la compresión simple. Los resultados se muestran en la Tabla 6.5.3.

Nº de muestras	51
Valor máximo	66.9
Valor mínimo	0.5
Media	20.1
Desviación típica	18.1
Coefficiente de variación	89.91 %

Tabla 6.5.3. Resultados de la resistencia a compresión simple (kg/cm²). DIT14-201.

Se ha determinado el histograma y el tanto por ciento acumulado de la resistencia a compresión simple (Figura 6.5.7) de los datos de los ensayos realizados para el proyecto de la Variante de Alcoy.

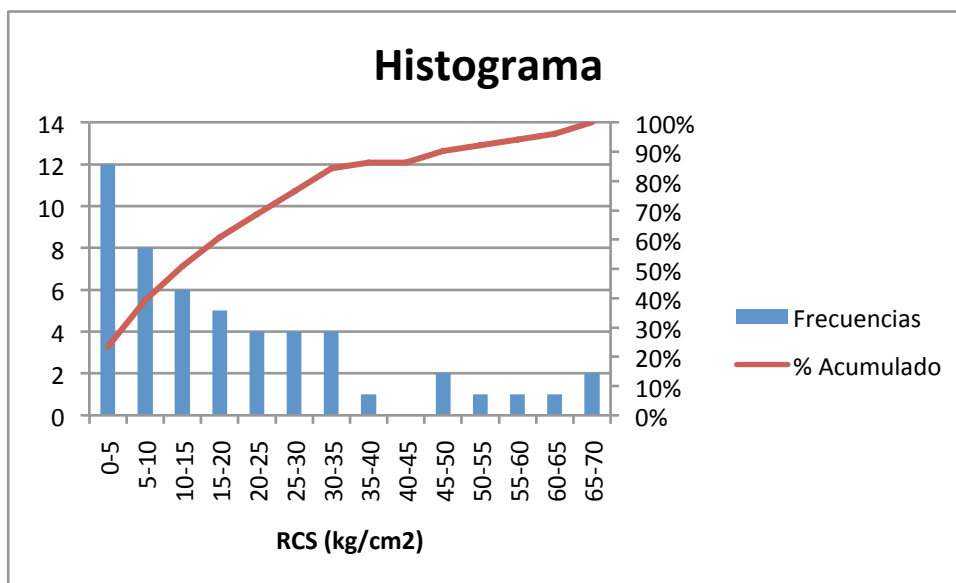


Figura 6.5.7. Histograma y % acumulado de la RCS (sondeos).

Se observa que el rango de valores de resistencia a la compresión simple obtenidos en los ensayos para el proyecto de la Variante de Alcoy es muy amplio, con un máximo de 66.9 kg/cm² y un mínimo de 0.5 kg/cm², resultando un valor medio de 20.1 kg/cm². La desviación típica es de 18 kg/cm² y el coeficiente de variación del 90 %. Según la clasificación de las arcillas establecida por Terzagui y Peck en el año 1967 (Tabla 6.5.4) la mayoría de las muestras (82.35 %) son de consistencia dura. El resto se reparten en clasificadas como blandas (1.96 %), compactas (11.76 %) y muy compactas (3.92 %).

Usualmente la resistencia a la compresión simple puede utilizarse como una aproximación burda de la cohesión sin drenaje (Figura 6.5.8) a partir de la siguiente expresión:

$$cu = qu/2$$

Por lo que la estimación de la media de la cohesión no drenada es de 10 kg/cm².

CONSISTENCIA DE LAS ARCILLAS	RESISTENCIA Q_u EN MPA	N30 DEL SPT
MUY BLANDA	< 0.025	< 2
BLANDA	0.025 – 0.050	2 -4
POCO COMPACTA	0.050 – 0.100	4 – 8
COMPACTA	0.100 – 0.200	8 – 15
MUY COMPACTA	0.200 – 0.400	15 – 30
DURA	> 0.400	> 30

Tabla 6.5.4. Consistencia de las arcillas en función de su resistencia a compresión simple y su valor N30 del SPT (Terzagui y Peck, 1967).

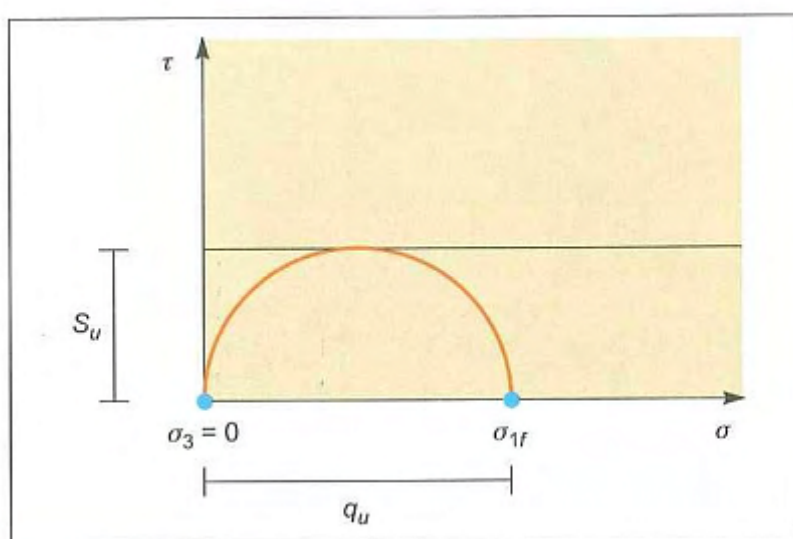


Figura 6.5.8. Relación entre c_u y q_u . Tomado de González de Vallejo (2002).

En la Figura 6.5.9 se han representado todas las resistencias a compresión simple en función de la profundidad.

Como se puede observar no existe una relación aparente en la resistencia a compresión simple y la profundidad en la formación. El hecho de representar todos los datos en un mismo gráfico puede provocar que la conclusión a la que se ha llegado sea errónea, ya que la dispersión y no correlación que puede existir en planta enmascara la relación que pueda existir entre la RCS y la profundidad.

Para solventar este inconveniente se ha representado la variación de la RCS con la profundidad en varios sondeos individualmente (Figura 6.5.10). De esta forma se puede comprobar si existe relación sin la interferencia de las variaciones en planta.

No se ha encontrado una posible relación entre la resistencia a la compresión simple y la profundidad.

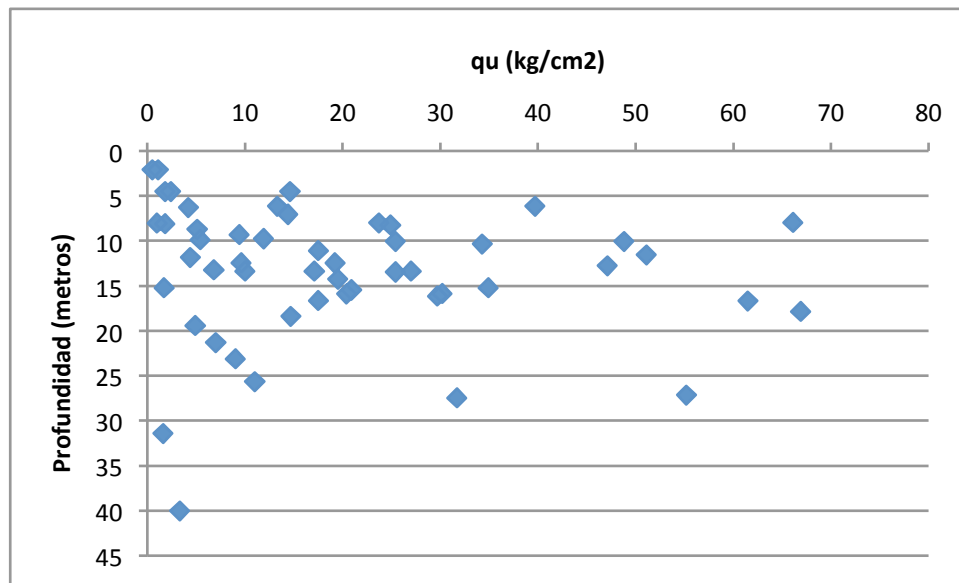


Figura 6.5.9. Resistencia a la compresión simple en función de la profundidad.

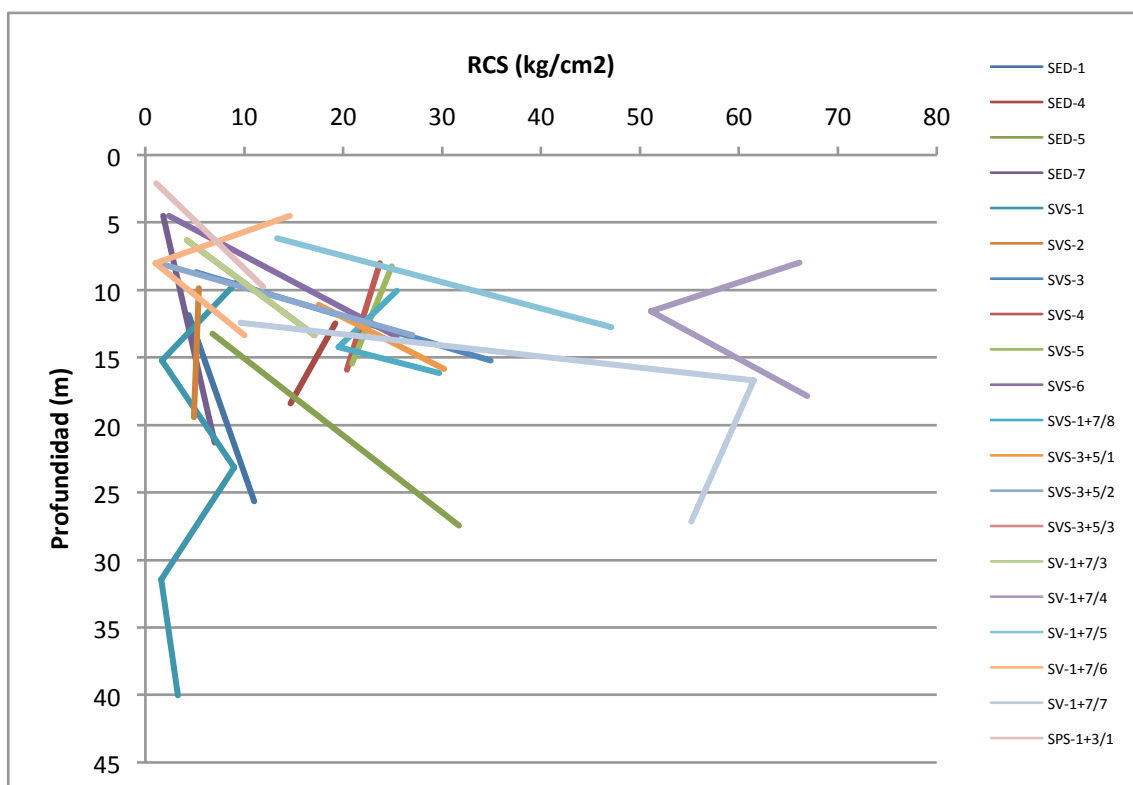


Figura 6.5.10. Relación entre la resistencia a la compresión simple y la profundidad por sondeo.

En la Figura 6.5.11 se muestra la relación entre la resistencia a compresión simple y la plasticidad. Se observa una línea de tendencia que relaciona mayor plasticidad con mayor resistencia a compresión simple.

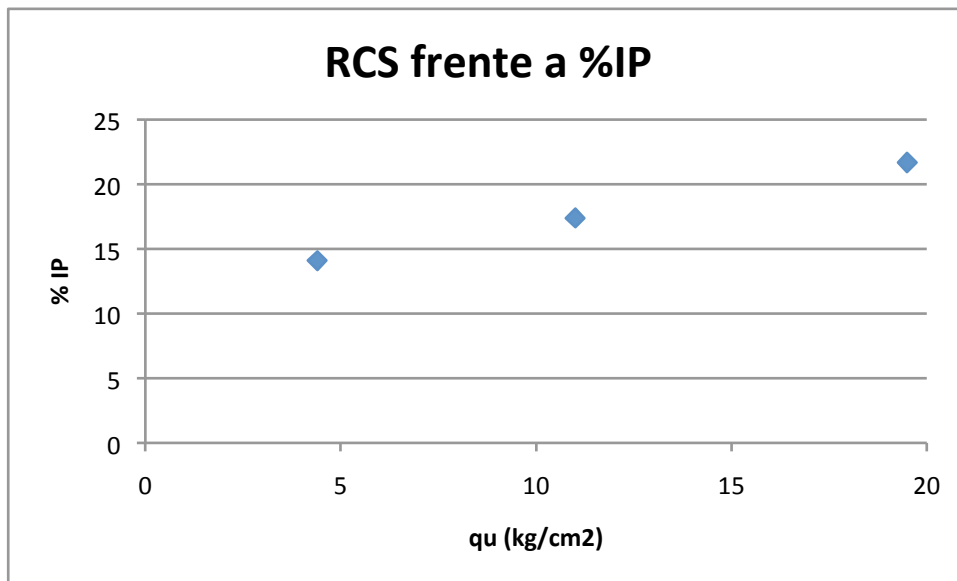


Figura 6.5.11. Relación entre la resistencia a la compresión simple y la plasticidad.

En la Figura 6.5.12 se muestra la relación entre la resistencia a compresión simple y el porcentaje de finos.

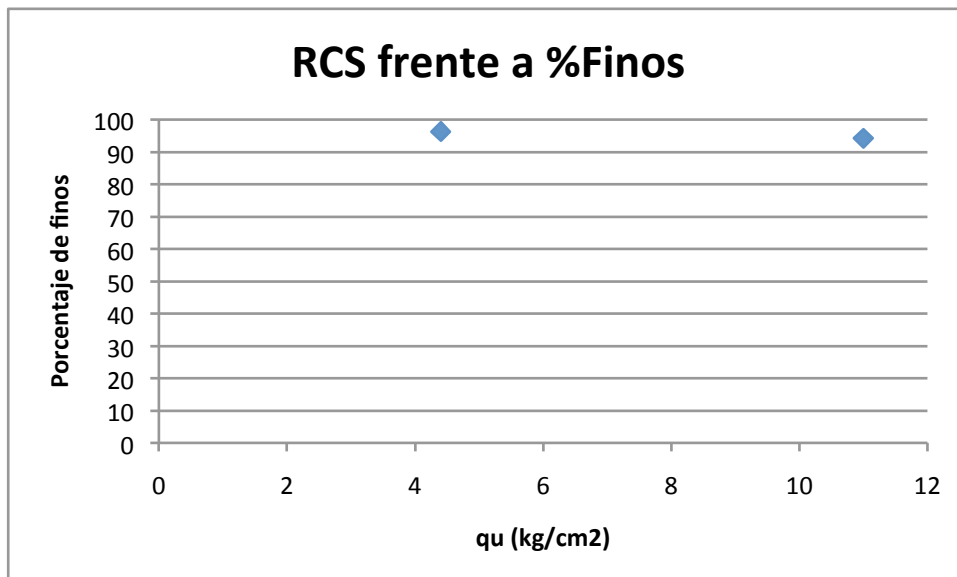


Figura 6.5.12. Relación entre la resistencia a la compresión simple y el porcentaje de finos (sondeo).

6.5.3.3 DIT14-601: Variante de Montaberner

Se han realizado 3 ensayos para determinar la resistencia a la compresión simple. Los resultados se muestran en la Tabla 6.5.5.

Nº de muestras	3
Valor máximo	67.4
Valor mínimo	5.2
Media	44.1
Desviación típica	33.91
Coefficiente de variación	76.89 %

Tabla 6.5.5. Resultados del ensayo de compresión simple (kg/cm²). DIT14-601.

Se ha determinado el histograma y el tanto por ciento acumulado de la resistencia a compresión simple (Figura 6.5.12) de los datos de los ensayos realizados para el proyecto de la Variante de Montaberner.

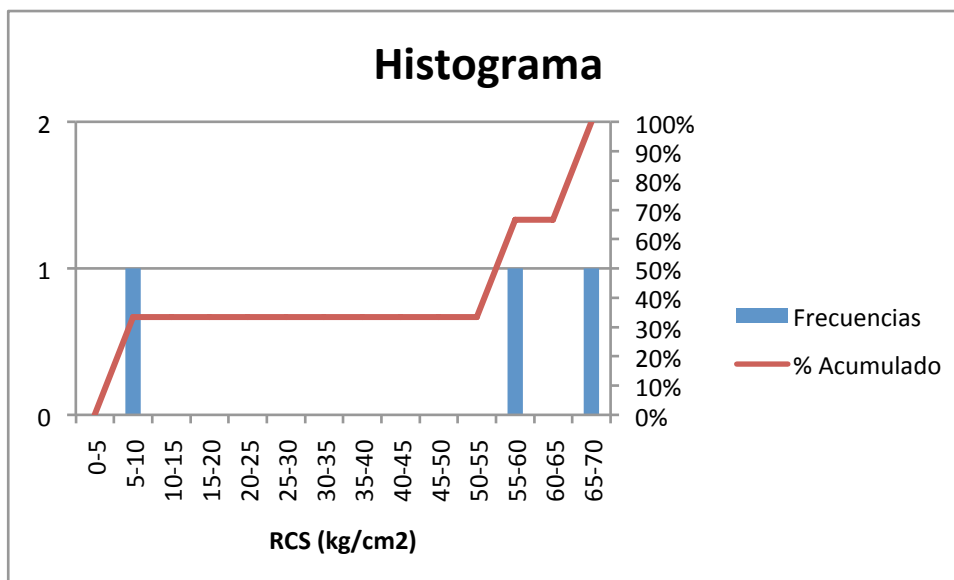


Figura 6.5.12. Histograma de la resistencia a compresión simple. DIT14-601.

Se observa que el rango de valores de resistencia a la compresión simple obtenidos en los ensayos para el proyecto de la Variante Montaberner es muy amplio, con un máximo de 67.4 kg/cm² y un mínimo de 5.2 kg/cm², resultando un valor medio de 44.1 kg/cm². La desviación típica es de 33.91 kg/cm² y el coeficiente de variación del 76.89 %. Según la clasificación de las arcillas establecida por Terzagui y Peck en el año 1967 (Tabla 6.5.4) los tres ensayos realizados a las arcillas miocenas de esta área tienen consistencia dura.

La estimación media de la cohesión no drenada (c_u) es de 22 kg/cm².

La Figura 6.5.13 muestra la relación entre la resistencia a compresión simple y la profundidad.

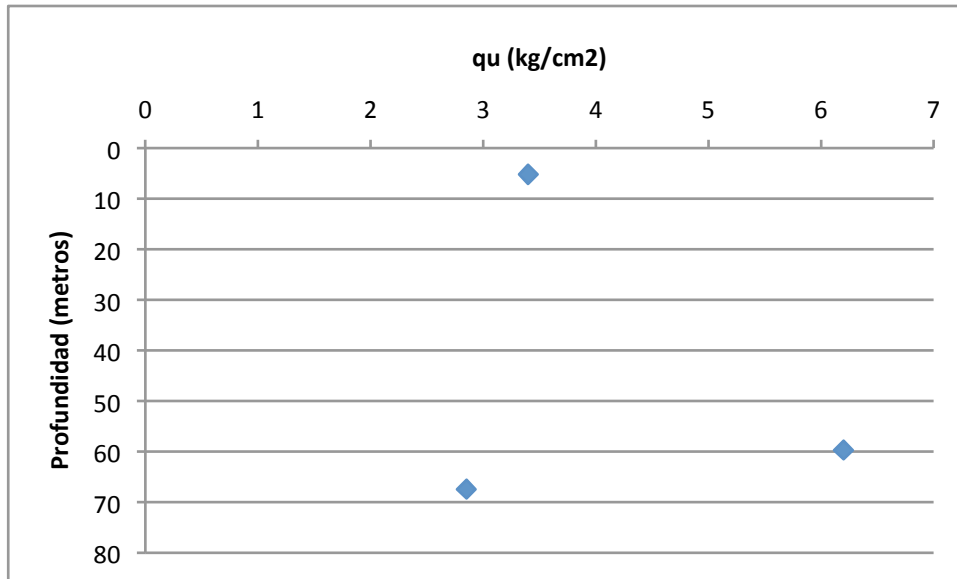


Figura 6.5.13. Relación entre la resistencia a compresión simple y la profundidad. DIT14-601.

La Figura 6.5.14 muestra la relación entre la resistencia a compresión simple y el porcentaje de finos. En este caso valores más altos de plasticidad se relacionan con una menor resistencia a compresión simple. Serían necesarios más datos para extraer una conclusión clara al respecto de esta relación.

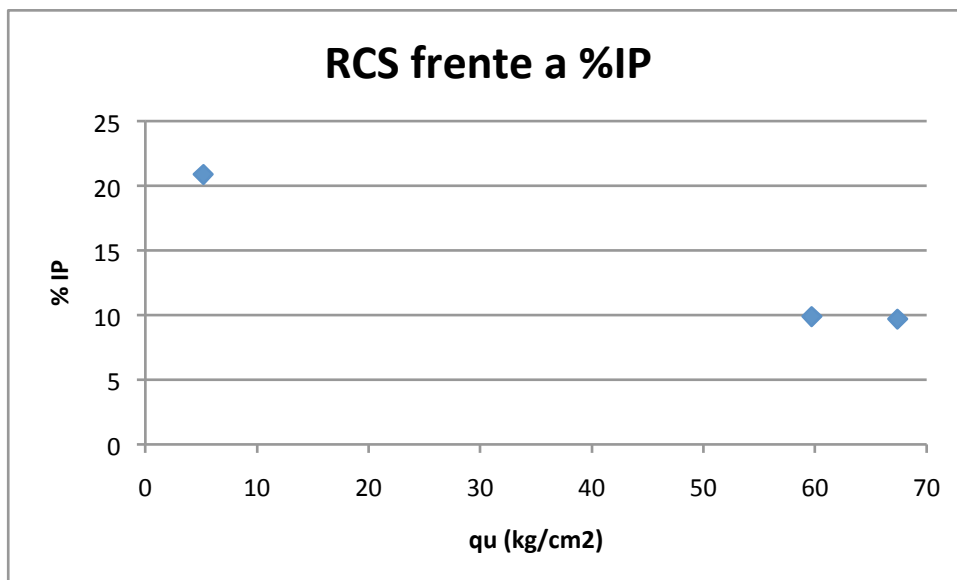


Figura 6.5.14. Relación entre la Resistencia a compresión simple y la plasticidad. DIT14-601.

6.5.3.4 DIT14-1001: Variante de Benisa

Se han realizado 23 ensayos para determinar la resistencia a la compresión simple. Los resultados se muestran en la Tabla 6.5.7.

Nº de muestras	27
Valor máximo	691.0
Valor mínimo	3.2
Media	269.7
Desviación típica	187.6
Coefficiente de variación	69.57 %

Tabla 6.5.7. Resultados del ensayo de Resistencia a Compresión Simple. DIT14-1001.

Se ha determinado el histograma y el tanto por ciento acumulado de la resistencia a compresión simple (Figura 6.5.15) de los datos de los ensayos realizados para el proyecto de la Variante de Benisa.

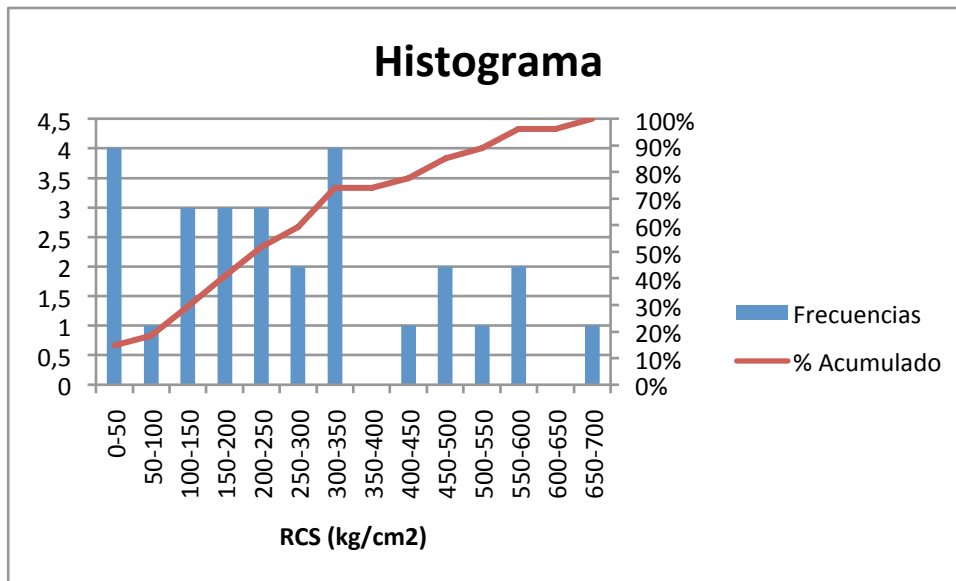


Figura 6.5.15. Histograma de la resistencia a compresión simple. DIT14-1001.

Se observa que el rango de valores de resistencia a la compresión simple obtenidos en los ensayos para el proyecto de la Variante Montaberner es muy amplio, con un máximo de 691.0 kg/cm² y un mínimo de 3.2 kg/cm², resultando un valor medio de 269.7 kg/cm², mucho mayor que en el de los anteriores proyectos. Estos valores tan elevados corresponden a la roca intacta carbonatada presente en la zona de Benisa. La desviación típica es de 187.6 kg/cm² y el coeficiente de variación del 69. %. Según la clasificación de las arcillas establecida por Terzagui y Peck en el año

Capítulo 6. Resultados procedentes de datos de los proyectos constructivos

1967 (Tabla 6.5.4) la gran mayoría de las muestras (92.6 %) son de consistencia dura, siendo las correspondientes al 7.4 % restante de consistencia muy compacta.

La estimación media de la cohesión no drenada (c_u) es de 135 kg/cm².

Las Figuras 6.5.16 y 6.5.17 muestran respectivamente la relación de la resistencia a compresión simple con la profundidad y la relación de la resistencia a compresión simple con la profundidad en sondeo. Aunque no de manera generalizada, se aprecia un aumento de resistencia a compresión simple con mayores profundidades en un mismo sondeo.

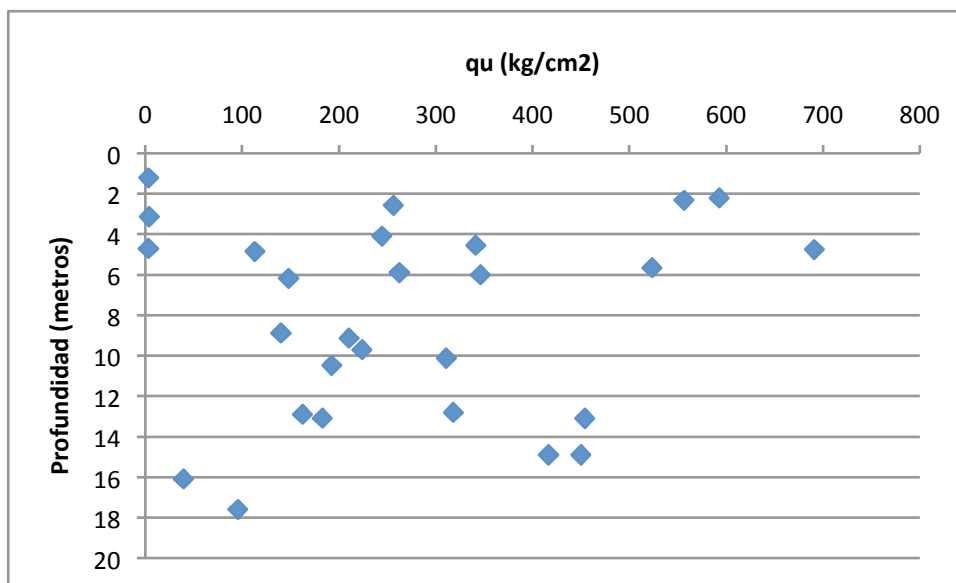


Figura 6.5.16. Relación de la resistencia a compresión simple con la profundidad. DIT14-1001.

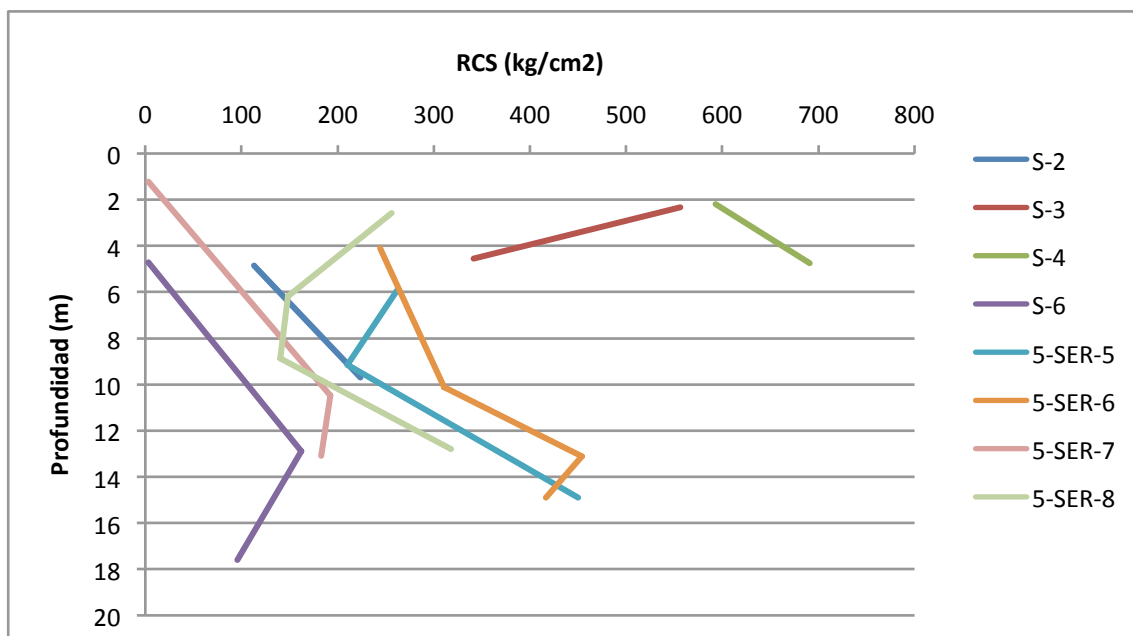


Figura 6.5.17. Relación de la resistencia a compresión simple con la profundidad en sondeos. DIT14-1001.

Por su parte, las Figuras 6.5.18 y 6.5.19 muestran la relación entre la resistencia a compresión simple con la plasticidad y con el porcentaje de finos. Debido a las pocas muestras en las que se han realizado ambos ensayos, no tenemos suficientes datos como para extraer conclusiones al respecto, aunque en las gráficas se observa una mayor resistencia a compresión simple con mayor plasticidad y con menor porcentaje de finos.

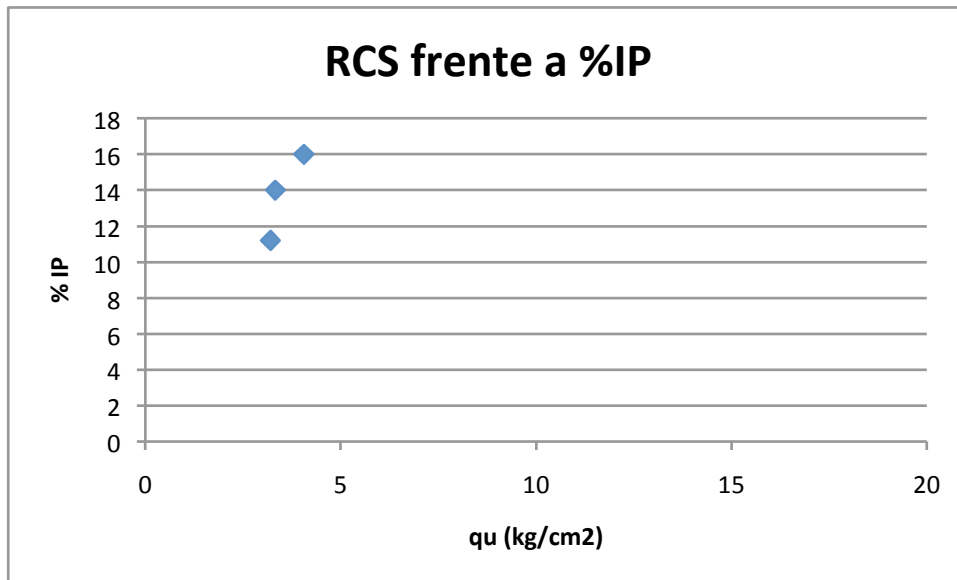


Figura 6.5.18. Relación entre la resistencia a compresión simple y la plasticidad. DIT14-1001.

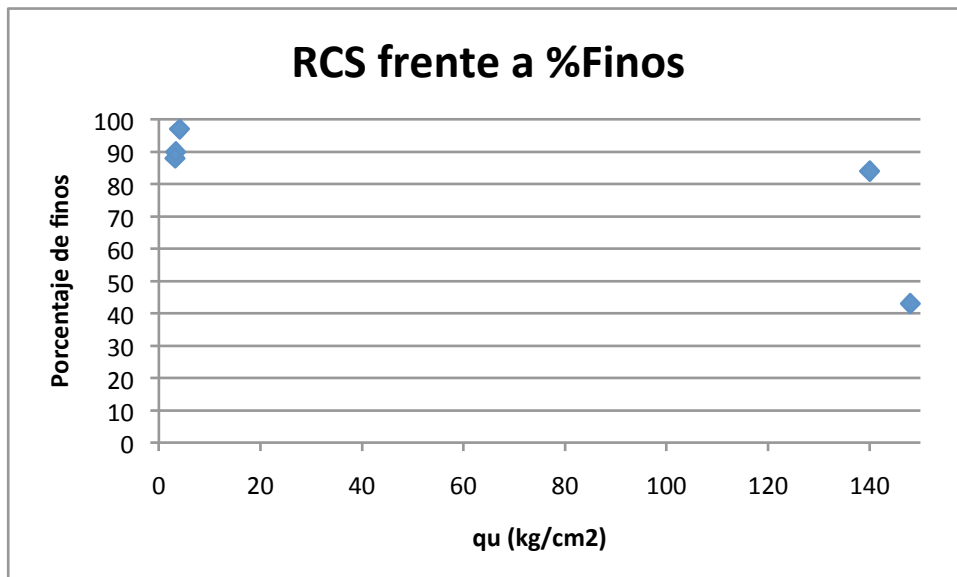


Figura 6.5.19. Relación entre la resistencia a compresión simple y el porcentaje de finos. DIT14-1001.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

7.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se van a mostrar y analizar los resultados obtenidos en laboratorio de los diferentes ensayos realizados a las muestras de roca blanda margosa pertenecientes al dominio de las facies Tap, objeto de esta tesis. La designación y origen de las muestras, es la siguiente:

- DIT14-201: Muestras procedentes de Alcoy.
- DIT14-601: Muestras procedentes de Montaberner.
- DIT14-1001: Muestras procedentes de Benisa.

7.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

7.2.1 Generalidades

Los ensayos que sirven para identificar los suelos son los primeros que se realizan, tanto en campo como en laboratorio, y deben ejecutarse de forma coordinada con la Geología de la zona (Morilla, 2012).

En este apartado se van a mostrar los resultados de los ensayos de caracterización de las muestras relativos a la humedad, plasticidad, granulometría, resistencia a compresión simple, peso específico, densidad aparente, contenidos en materia orgánica, sulfatos y carbonatos, conductividad y composición petrográfica y textural.

7.2.2 Humedad y propiedades índice

Los resultados de humedad natural (w_{nat}) y humedad higroscópica (w_{higr}) obtenidos en el laboratorio se muestran en la Tabla 7.2.1. La humedad natural es la humedad que contiene la muestra en el momento de ser extraída, mientras que la humedad higroscópica es la humedad que la muestra es capaz de absorber del ambiente. Se obtuvieron las propiedades índice de varios fragmentos de roca de las muestras DIT14-1001 (Tablas 7.2.2 a 7.2.4).

	DIT14-201	DIT14-601	DIT14-1001
w_{nat} (%)	13.9	8.3	19.4
w_{higr} (%)		2.4	

Tabla 7.2.1. Valores medios de humedad natural y humedad higroscópica.

	FORMULAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	
TARA (REF. TARA)	T				g
TARA + MUESTRA HÚMEDA	$T+M_h$				g
TARA + MUESTRA SECA	$T+M_s$				g
PESO MUESTRA HÚMEDA (M_h)	$(T+M_h) - T$	2737	1071.73		g
PESO DE LA MUESTRA SECA (M_s)	$(T+M_s) - T$	2633.2	1018.36		g
AGUA (A)	$M_h - M_s$	103.8	53.37		g
HUMEDAD (W)	$(A / M_s) \cdot 100$	3.94	5.24		%

Tabla 7.2.2. Peso seco y humedad natural de la muestra A en la zona DIT14-1001.

PESO MUESTRA SAT. SUP. SECA	M_{SSS}	2751.4	1076.4		g
PESO SUMERGIDO M. SATURADA	M'_{SSS}	1619.6	628.5		g
VOLUMEN DE LA MUESTRA (V_T)	$M_{SSS} - M'_{SSS}$	1131.8	447.95		cm ³

Tabla 7.2.3. Volumen de la muestra A en la zona DIT14-1001 - Método de la pesada hidrostática.

CONDICIONES DE SATURACIÓN	TIPO DE AGUA : Agua del grifo		TIEMPO DE SATURACIÓN: 72 H		
VOLUMEN DE LA MUESTRA	V_T				cm ³
VOLUMEN DE AGUA ABSORVIDA	$V_{hac} = M_{SSS} - M_s$	118.2	58.1		cm ³
PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTIC.	$G_s = M_s / V_s$				g/cm ³
VOLUMEN DE LAS PAR. SÓLIDAS	$V_s = M_s / G_s$				g/cm ³
HUMEDAD NATURAL:	W				%
DENSIDAD APARENTE:	M_h / V_T	2.42	2.39		g/cm ³
DENSIDAD SECA:	M_s / V_T	2.33	2.27		g/cm ³
POROSIDAD EFICAZ (n_e):	$(V_{hac} / V_T) \cdot 100$	10.44	12.97		%
POROSIDAD TOTAL (n):	$((V_T - V_s) / V_T) \cdot 100$				%

Tabla 7.2.4. Obtención de los parámetros de estado. DIT14-1001.

7.2.3 Plasticidad – Límites de Atterberg

7.2.3.1 Generalidades

Los resultados medios obtenidos relativos a las características de plasticidad de las muestras se resumen en la Tabla 7.2.5.

	LL	LP	IP	LR
DIT14-201	36.0	20.1	15.9	13.4
DIT14-601	44.5	34.6	9.9	--
DIT14-1001	38.1	23.1	15.0	--

Tabla 7.2.5. Valores medios de los Límites de Atterberg.

A continuación, en los siguientes apartados, se analizan los resultados obtenidos individualmente para cada una de las muestras.

7.2.3.2 DIT14-201: Alcoy

Los valores medios (Figura 7.2.1) del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad obtenidos tras la realización de los ensayos de “Límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande” y “Límite plástico de un suelo” son los siguientes:

$$LL = 36.0 \%$$

$$LP = 20.1 \%$$

$$IP = 15.9 \%$$

$$LR = 13.4 \%$$

A partir de estos valores y el de la humedad natural del suelo, que es del 13.9 % (valor medio) es posible obtener el índice de Consistencia (*IC*) y el índice de Fluidez (*IF*). El primero mide el grado de acercamiento del suelo al estado sólido y el segundo mide el grado de acercamiento al estado líquido:

$$IC = (LL - w_{natural}) / IP = 36.0 - 13.9 / 15.9 = 1.39$$

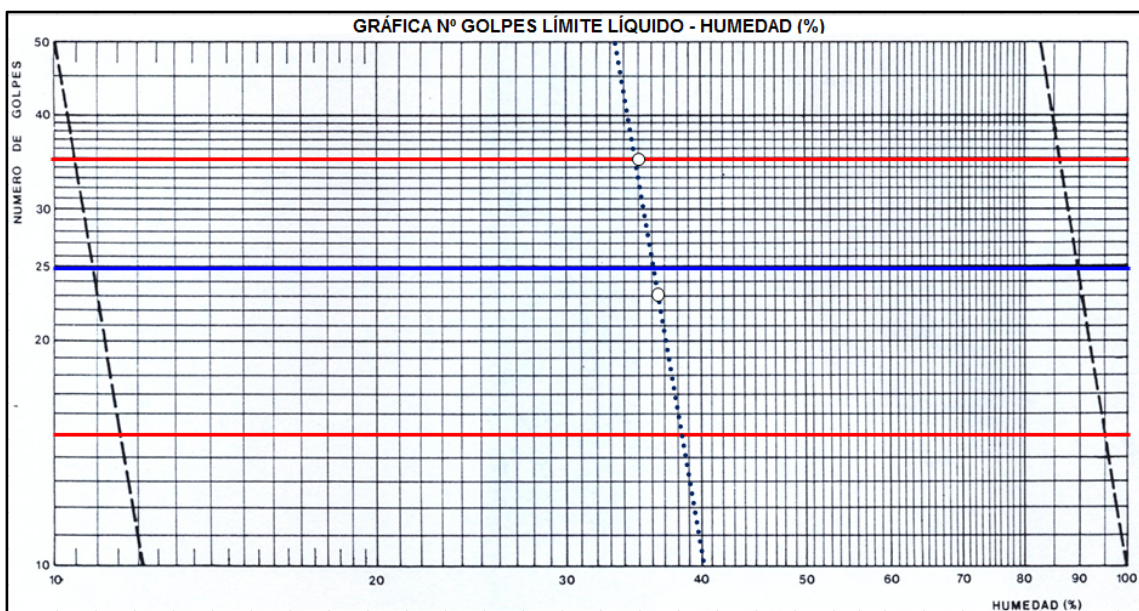


Figura 7.2.1. Obtención de la humedad del límite líquido. Valores medios para las muestras DIT14-201.

La tabla 7.2.6 muestra una correlación entre el índice de consistencia y el estado aproximado del suelo. Para el valor obtenido, se observa que el estado aproximado del suelo sólido.

ÍNDICE DE CONSISTENCIA	ESTADO APROXIMADO DEL SUELO
< 0	LÍQUIDO
0 A 0.25	SEMILÍQUIDO
0.25 A 0.50	PLÁSTICO MUY BLANDO
0.50 A 0.75	PLÁSTICO BLANDO
0.75 A 1	PLÁSTICO DURO
> 1	SÓLIDO

Tabla 7.2.6. Tabla de aproximación al estado del suelo basada en el índice de Consistencia (Morilla, 2012).

De la misma forma, la tabla 7.2.7 muestra una correlación entre el índice de fluidez y el estado aproximado del suelo.

ÍNDICE DE FLUIDEZ	ESTADO APROXIMADO DEL SUELO
> 1	LÍQUIDO
0.75 A 1	SEMILÍQUIDO
0.50 A 0.75	PLÁSTICO MUY BLANDO
0.25 A 0.50	PLÁSTICO BLANDO
0 A 0.25	PLÁSTICO DURO
< 0	SÓLIDO

Tabla 7.2.7. Tabla de aproximación al estado del suelo basada en el índice de Fluidez (Morilla, 2012).

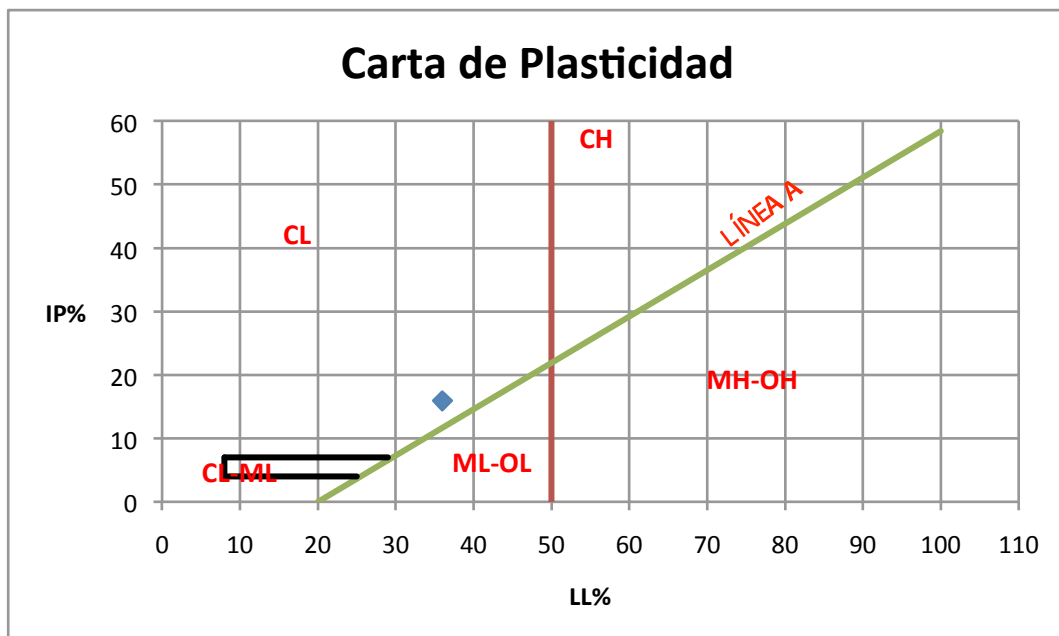


Figura 7.2.2. Gráfico de plasticidad de Casagrande. Valor medio para las muestras DIT14-201.

Para los suelos ensayados, obtenemos el siguiente valor medio de índice de Fluidez:

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

$$IF=(w_{natural}-LP)IP=13.9-20.115.9=-0.39$$

Valor que también define el estado aproximado del suelo ensayado como sólido.

Con los datos del límite plástico y el índice de plasticidad, podemos clasificar el suelo utilizando el Gráfico de plasticidad de Casagrande, tal y como se muestra en la Figura 7.2.2.

Así, atendiendo a la Carta de Plasticidad de Casagrande, los suelos ensayados se clasifican como arcillas de baja plasticidad (suelo CL).

Se ha obtenido, además, para estas muestra la curva de retracción (Figura 7.2.3) y el límite de retracción, con un valor medio de LR = 13.42 %, lo que significa que con humedades inferiores a este valor el suelo comienza a agrietarse.

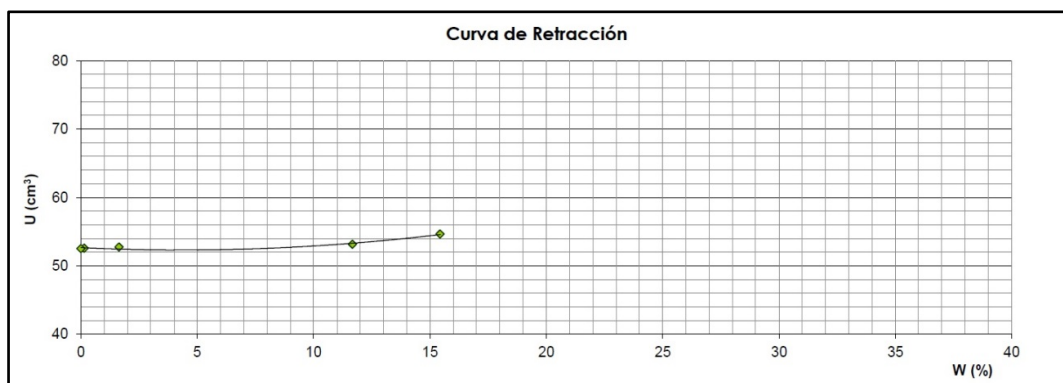


Figura 7.2.3. Curva de retracción.

7.2.3.3 DIT14- 601: Montaberner

Los valores medios (Figura 7.2.4) del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad obtenidos tras la realización de los ensayos de “Límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande” y “Límite plástico de un suelo” son los siguientes:

$$LL = 44.5 \%$$

$$LP = 34.6 \%$$

$$IP = 9.9 \%$$

La humedad natural de estas muestra está en torno al 8.3 %, considerablemente más baja que las analizadas en la zona anterior. Esto puede deberse, en parte, a que la toma de la muestra se realizó en una época más calurosa, aunque no debe descartarse otros factores. Los valores medios del índice de consistencia e índice de fluidez son los siguientes:

$$IC=(LL-w_{natural})IP=44.5-8.39.9=3.65$$

$$IF=(w_{natural}-LP)IP=8.3-34.69.9=-2.66$$

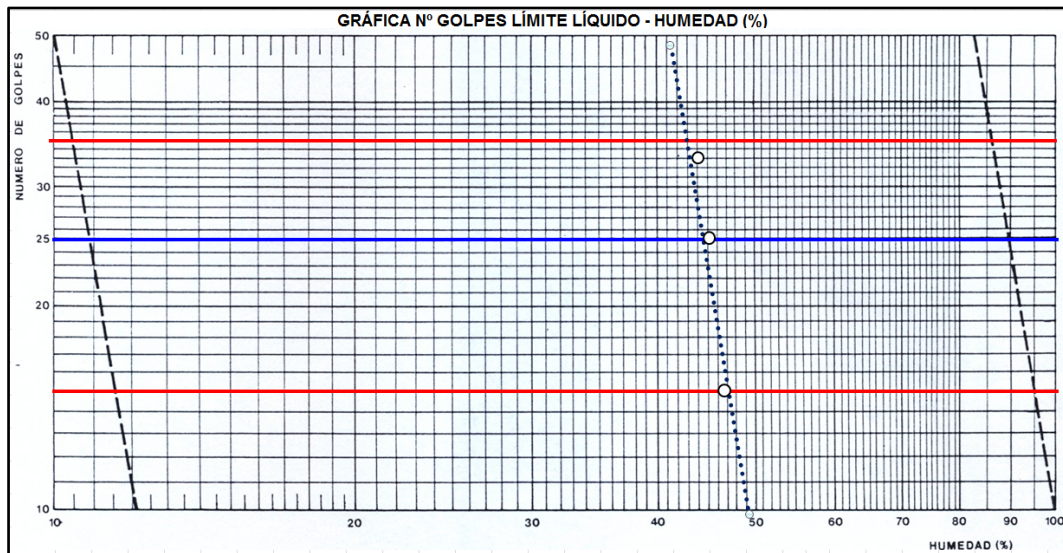


Figura 7.2.4. Obtención de la humedad del límite líquido. Valores medios para las muestras DIT14-601.

Ambos valores y, según la Tabla 7.2.6 y la Tabla 7.2.7, clasifican el estado aproximado de estos suelos como sólido.

Atendiendo a la clasificación que proporcionan los valores de límite líquido e índice de plasticidad, las muestras ensayadas se tratarían de un limo de baja plasticidad (Figura 7.2.5).

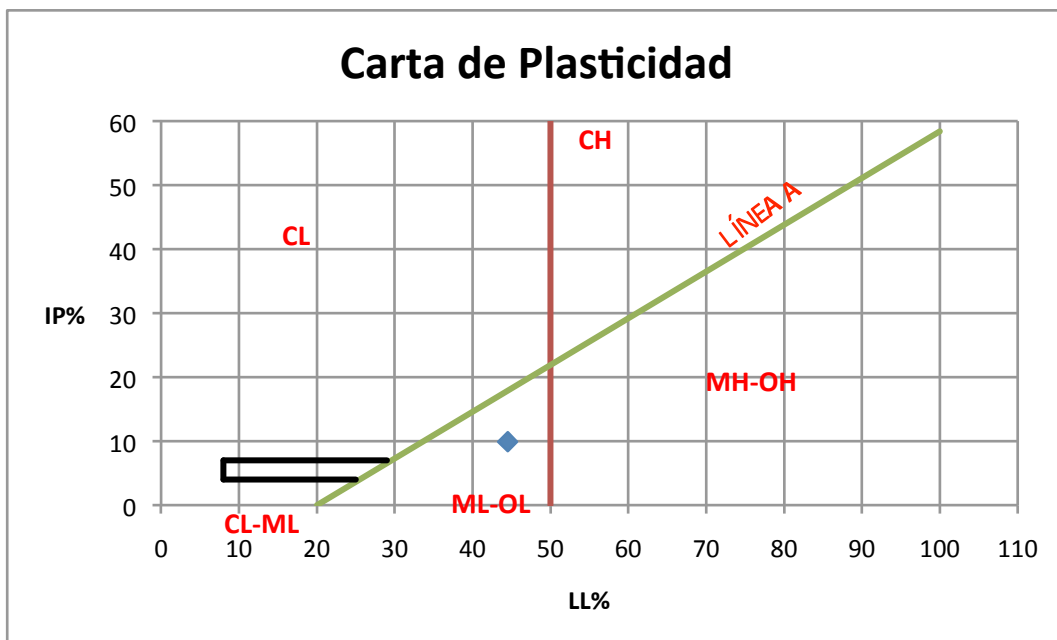


Figura 7.2.5. Gráfico de plasticidad de Casagrande. Valor medio para las muestras DIT14-601.

7.2.3.4 DIT14- 1001: Benisa

Los valores medios (Figura 7.2.6) del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad obtenidos tras la realización de los ensayos de “Límite líquido por el método de la cuchara de Casagrande” y “Límite plástico de un suelo” son los siguientes:

$$LL = 38.1 \%$$

$$LP = 23.1 \%$$

$$IP = 15.0 \%$$

La humedad natural de esta muestra es 19.3 %, considerablemente más alta que en el resto de muestras. Esto puede deberse, en parte, a que la toma de la muestra se realizó en una época menos calurosa, como es el mes de octubre. Los valores del índice de consistencia e índice de fluidez son los siguientes:

$$IC=(LL-w_{natural})IP=38.1-19.415.0=1.25$$

$$IF=(w_{natural}-LP)IP=19.4-23.115.0=-0.25$$

Ambos valores y, según la Tabla 7.2.6 y la Tabla 7.2.7, clasifican el estado aproximado del suelo como sólido.

Atendiendo a la Carta de Plasticidad de Casagrande, el suelo ensayado se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (Figura 7.2.7).

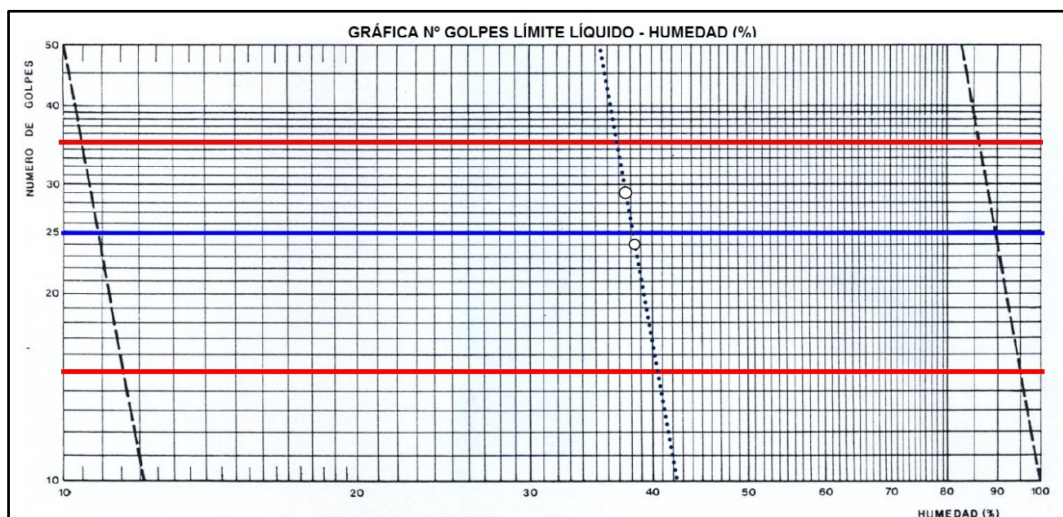


Figura 7.2.6. Obtención de la humedad del límite líquido. Valores medios para las muestras DIT14-1001.

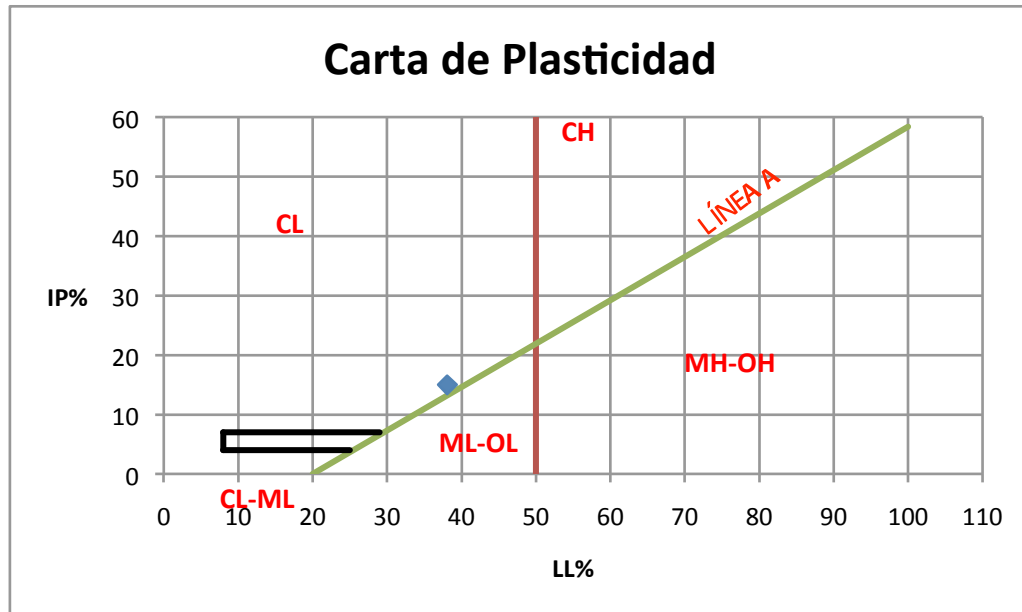


Figura 7.2.7. Gráfico de plasticidad de Casagrande. Valor medio para las muestras DIT14-1001.

7.2.4 Granulometría

7.2.4.1 Generalidades

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de granulometría por sedimentación y de granulometría por tamizado. Se adjunta, para cada muestra su curva granulométrica, una fotografía de la distribución de tamaños de partícula y se obtienen los siguientes parámetros, en los casos en que sea posible: Tamaño efectivo (D_{10}), Coeficiente de uniformidad (C_u) y Coeficiente de curvatura (C_c).

Para determinar la forma de las curvas granulométricas, su uniformidad y su curvatura se emplean los tamaños de tamiz que dejan pasar unos porcentajes del 60%, 30% y 10%, denominados respectivamente D_{60} , D_{30} y D_{10} (Morilla, 2012). La relación entre D_{60} y D_{10} se denomina Coeficiente de uniformidad e indica la mayor o menor uniformidad de las partículas del suelo, cuando su valor se acerque más a 1. El coeficiente de curvatura se emplea menos. Las expresiones que permiten determinar estos parámetros son las siguientes:

- Tamaño efectivo: D_{10} (mm)
- Coeficiente de uniformidad: $C_u = D_{60} / D_{10}$
- Coeficiente de curvatura: $C_c = D_{30}^2 / (D_{60} \cdot D_{10})$

7.2.4.2 Granulometría por sedimentación

Generalidades

Cuando se quieren delimitar las fracciones granulométricas inferiores a 80 micras, para separar limos y arcillas, y fracciones entre éstos, es necesario recurrir a las granulometrías por

sedimentación, que en función de la velocidad de “caída” de los granos, en condiciones normalizadas de temperatura y tipo de líquido, pueden separar las fracciones de entre 2 y 0.2 mm (arena gruesa), 0.2 y 0.02 mm (arena fina) 0.02 y 0.002 mm (Limo) y 0.002 y 0.0002 mm, (arcilla) u otros límites que se establezcan en casos especiales. Este procedimiento se basa en la Ley de Stokes, que regula la velocidad de caída de esferas de un determinado peso y volumen en un líquido. Aunque simplifica, no teniendo en cuenta otras variables físico-químicas, da buenos resultados (Morilla, 2012).

DIT14-201: Alcoy

Dado que se tratan de suelos arcillosos, el ensayo de granulometría por sedimentación es más apropiado que el de granulometría por tamizado, dado que proporciona información sobre la distribución granulométrica de la fracción fina. La Figura 7.2.8 muestra la curva granulométrica considerada como representativa de las muestras ensayadas.

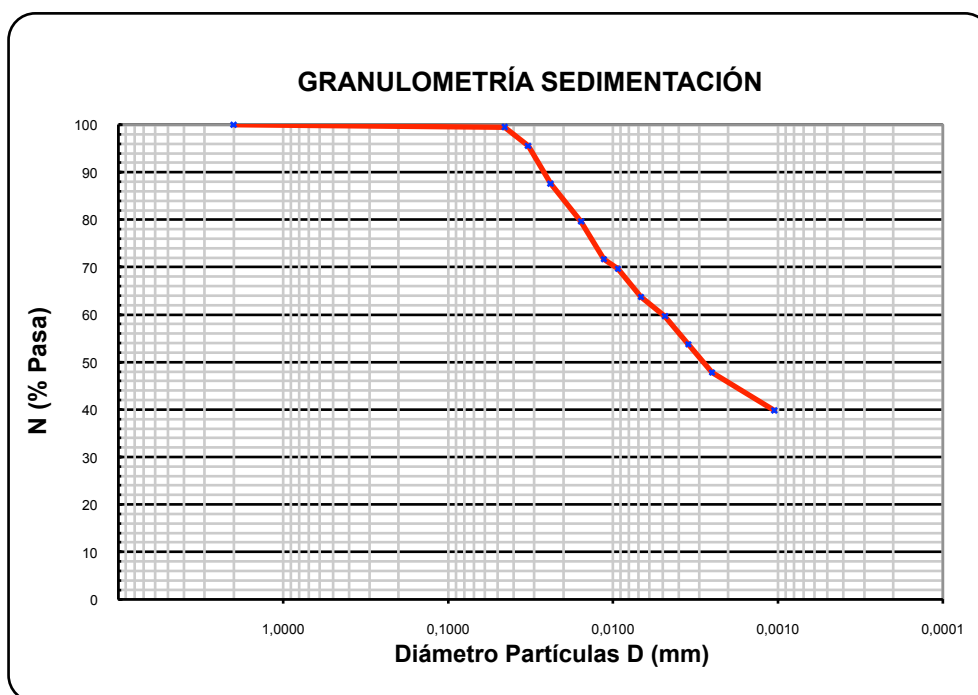


Figura 7.2.8. Curva granulométrica representativa de la fracción fina. DIT14-201.

7.2.4.3 Granulometría por tamizado

Generalidades

La Tabla 7.2.8 muestra la distribución de tamaño de partículas de todos los ensayos que se han realizado de granulometría por sedimentación, tanto de muestra extraída del talud como de la muestra conformada por los depósitos del ensayo de determinación de la durabilidad al desmoronamiento (SDT).

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

	Tipo de muestra	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	FINOS (%)
DIT14-201	Muestra 1	0.0	12.3	87.7
	Muestra 2	0.0	11.4	88.6
	Slake – Agua Alcoy	0.0	89.0	11.0
	Slake – Agua destilada	0.0	93.1	6.9
DIT14-601	Slake – Agua Montaberner	0.0	41.7	58.3
	Slake – Agua destilada	0.0	17.9	82.1
DIT14-1001	Slake – Marga calcárea	0.0	11.7	88.3
	Slake – Caliza margosa	0.0	12.1	87.9

Tabla 7.2.8. Distribución de tamaño de partículas.

Así mismo, en los apartados siguientes, se muestran las curvas granulométricas medias de todas las muestras ensayadas y una fotografía de los fragmentos retenidos desde el tamiz UNE 0.08 mm hasta el UNE 2 mm.

DIT14-201: Alcoy

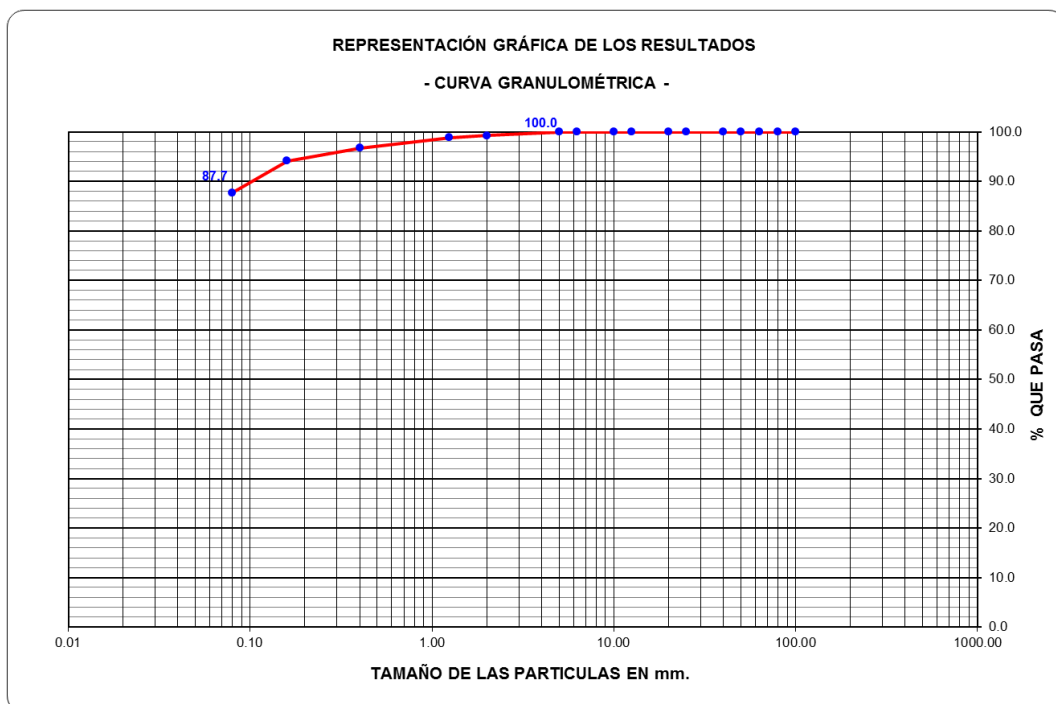


Figura 7.2.9. Curva granulométrica de la Muestra 1 de Alcoy. DIT14-201.



Figura 7.2.9. Distribución granulométrica de la Muestra 1 de Alcoy. DIT14-201.

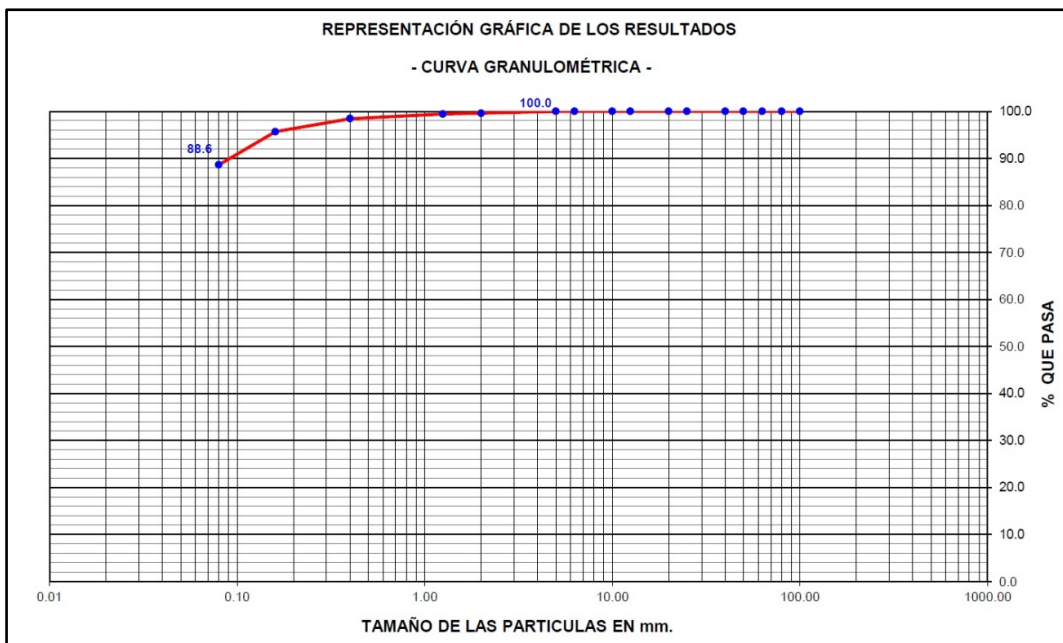


Figura 7.2.10. Curva granulométrica de la Muestra 2 de Alcoy. DIT14-201.



Figura 7.2.11. Distribución granulométrica de la Muestra 2 de Alcoy. DIT14-201.

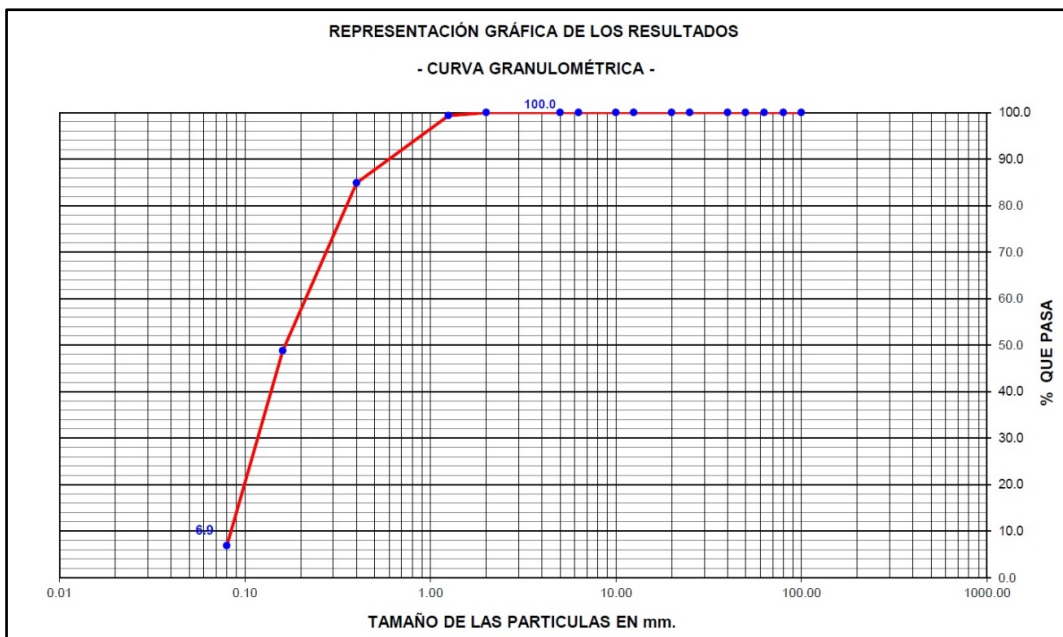


Figura 7.2.12. Curva granulométrica de la muestra Slake-Agua de Alcoy. DIT14-201.

- Diámetro eficaz: $D_{10} = 0.085 \text{ mm}$
- Coeficiente de uniformidad: $C_u = 0.220.085 = 2.6$
- Coeficiente de curvatura: $C_c = 0.1320.22 \cdot 0.85 = 0.09$

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

Lo que indica que se trata de un suelo muy uniforme en cuanto a la distribución de tamaño de grano.



Figura 7.2.13. Distribución granulométrica de la muestra Slake-Agua de Alcoy. DIT14-201.

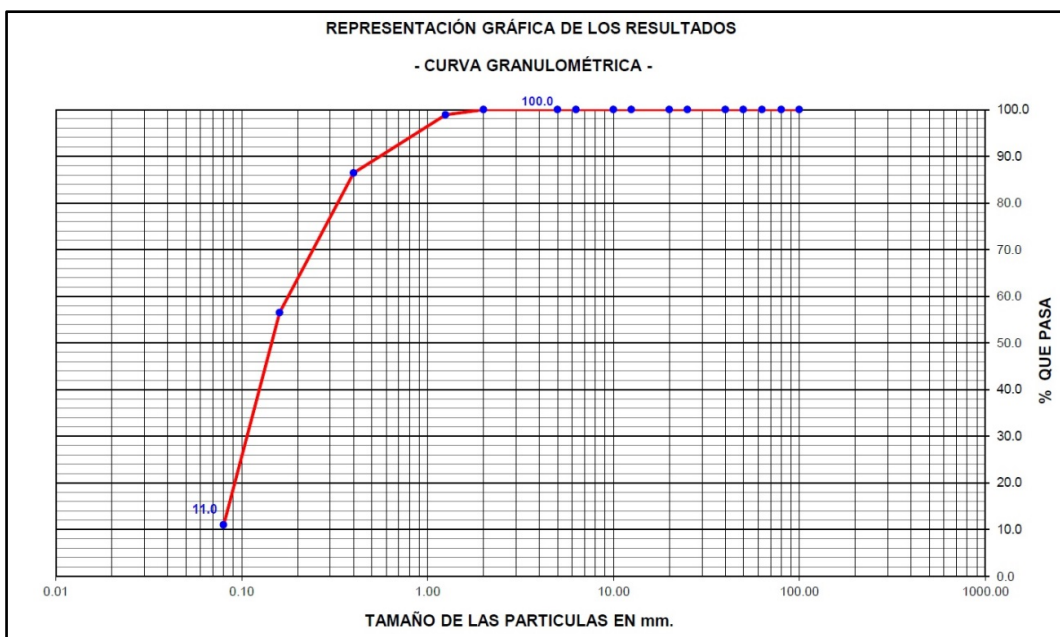


Figura 7.2.14. Curva granulométrica de la muestra Slake-Agua destilada. DIT14-201.

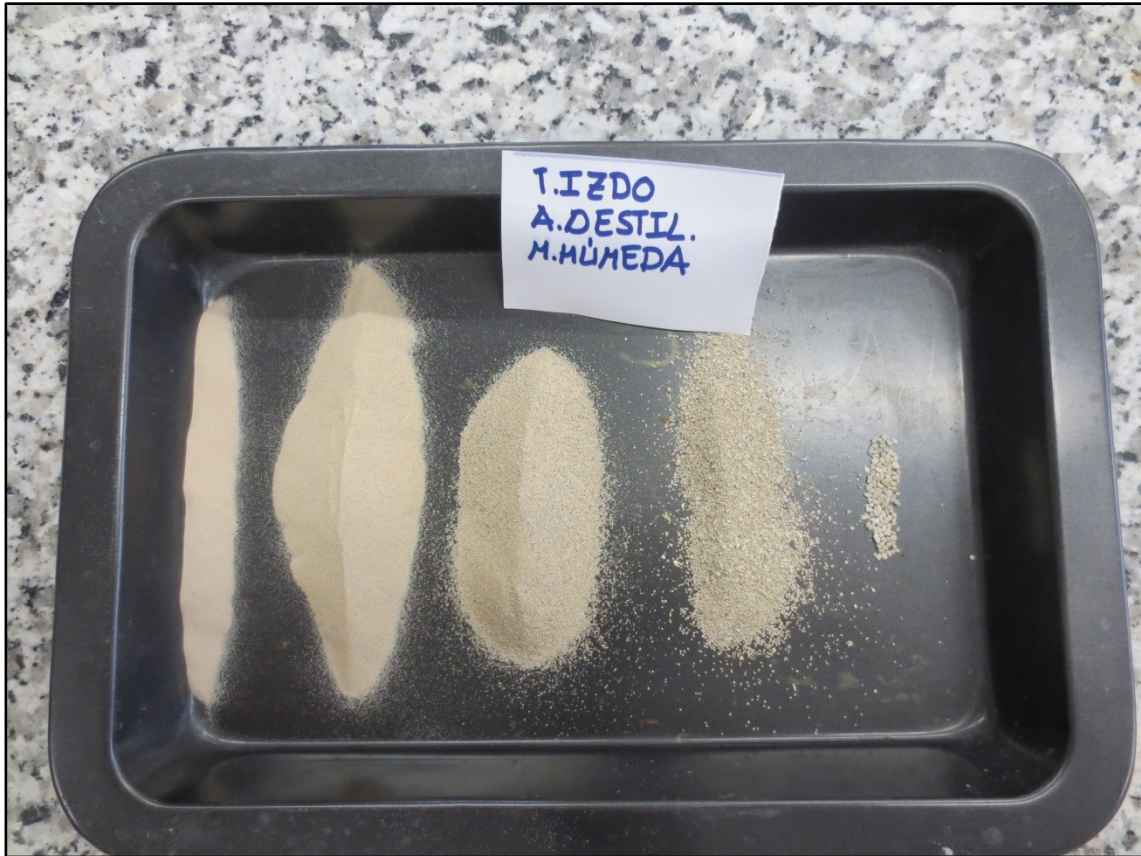


Figura 7.2.15. Distribución granulométrica de la muestra Slake-Agua destilada. DIT14-201.

DIT14-601: Montaberner

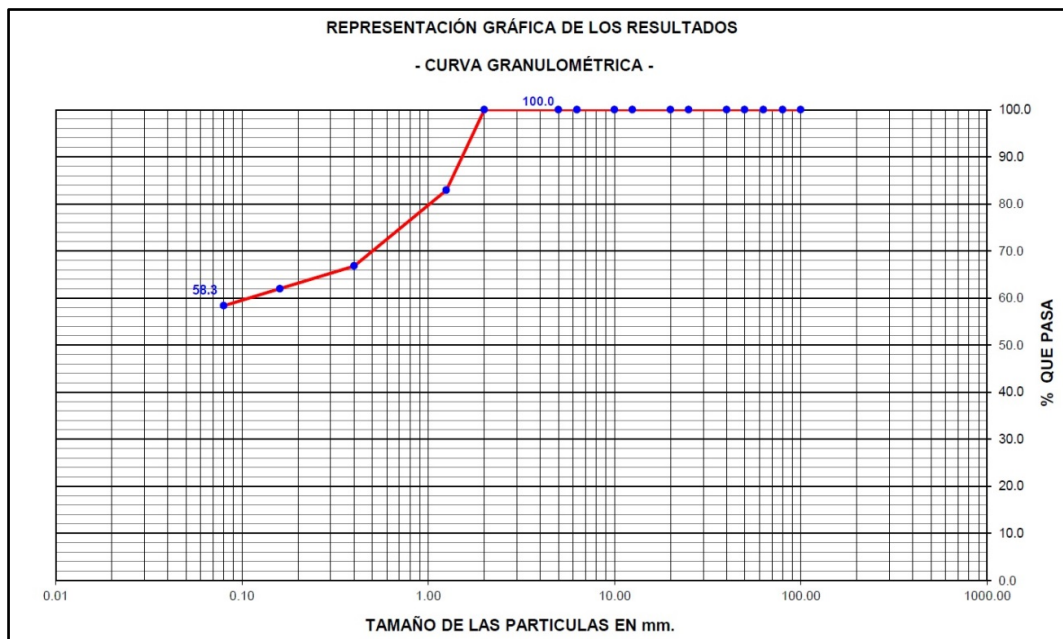


Figura 7.2.16. Curva granulométrica de la muestra Slake-Agua de Montaberner. DIT14-601.



Figura 7.2.17. Distribución granulométrica de la muestra Slake- Agua de Montaberner. DIT14-601.

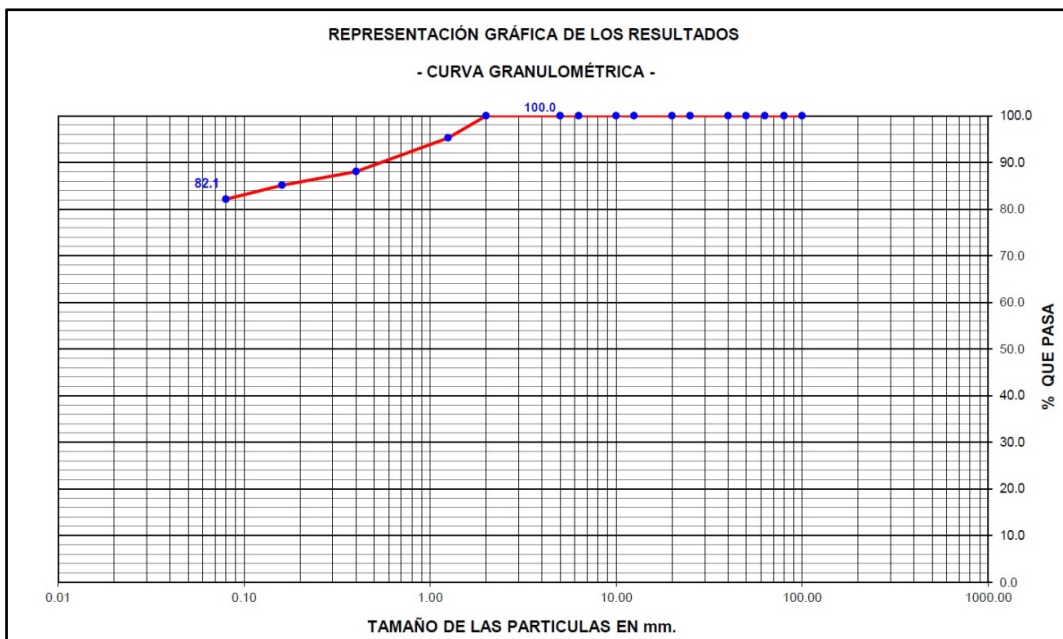


Figura 7.2.18. Curva granulométrica de la muestra Slake-Agua destilada. DIT14-601.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

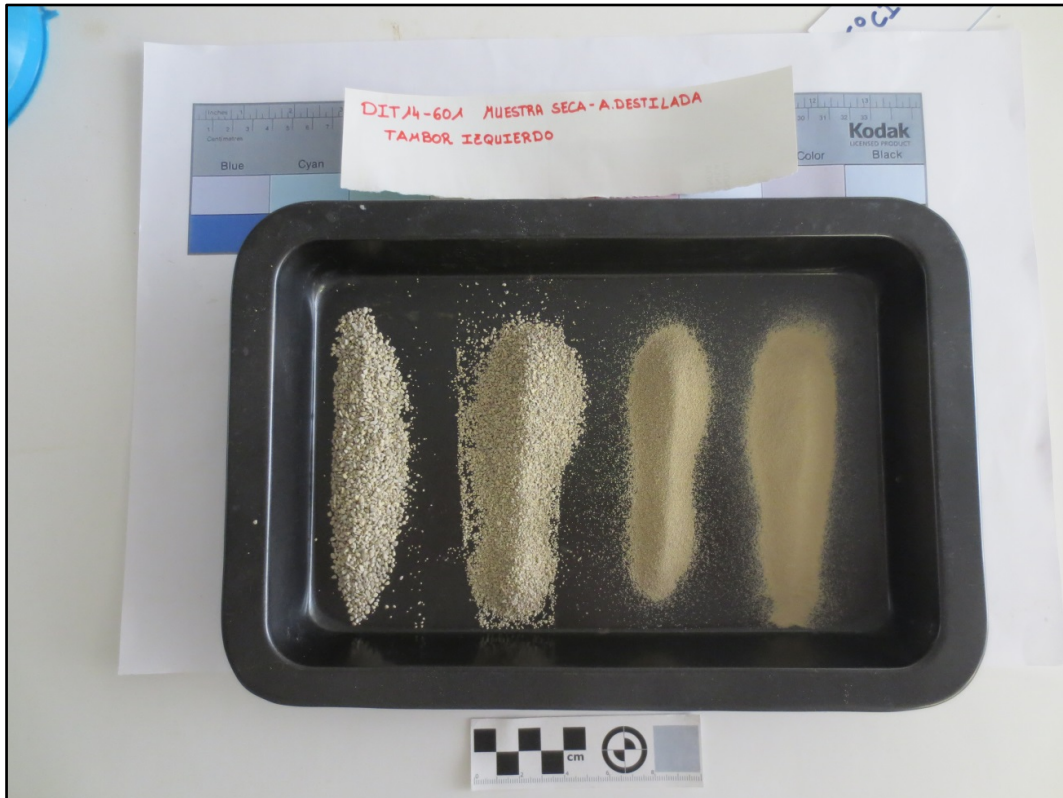


Figura 7.2.19. Distribución granulométrica de la muestra Slake-Agua destilada. DIT14-601.

DIT14-1001: Benisa

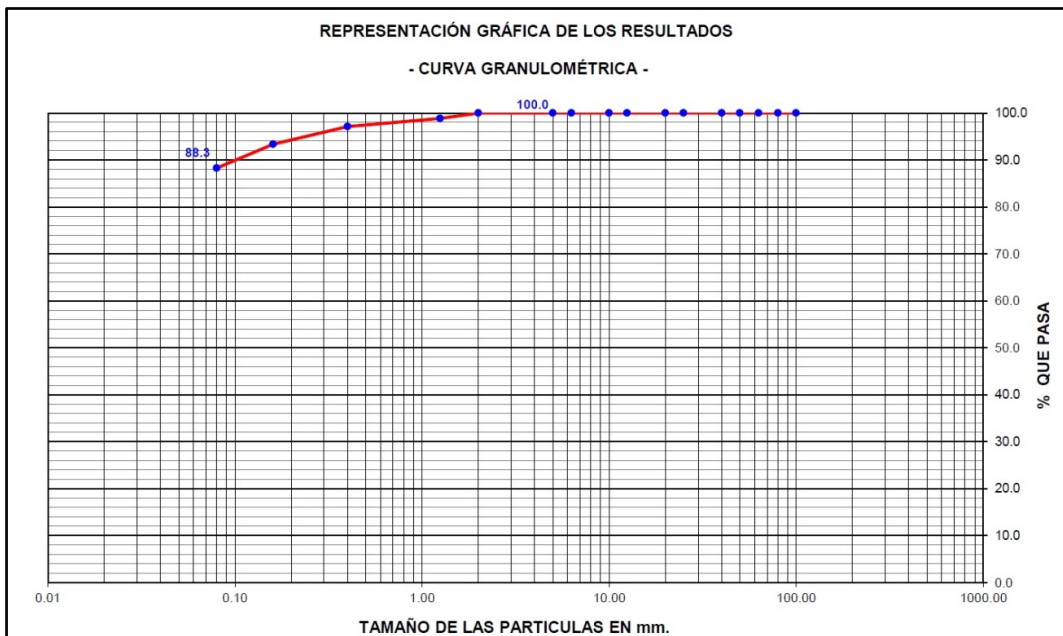


Figura 7.2.20. Curva granulométrica de la muestra de marga calcárea. DIT14-1001.



Figura 7.2.21. Distribución granulométrica de la muestra de marga calcárea. DIT14-1001.

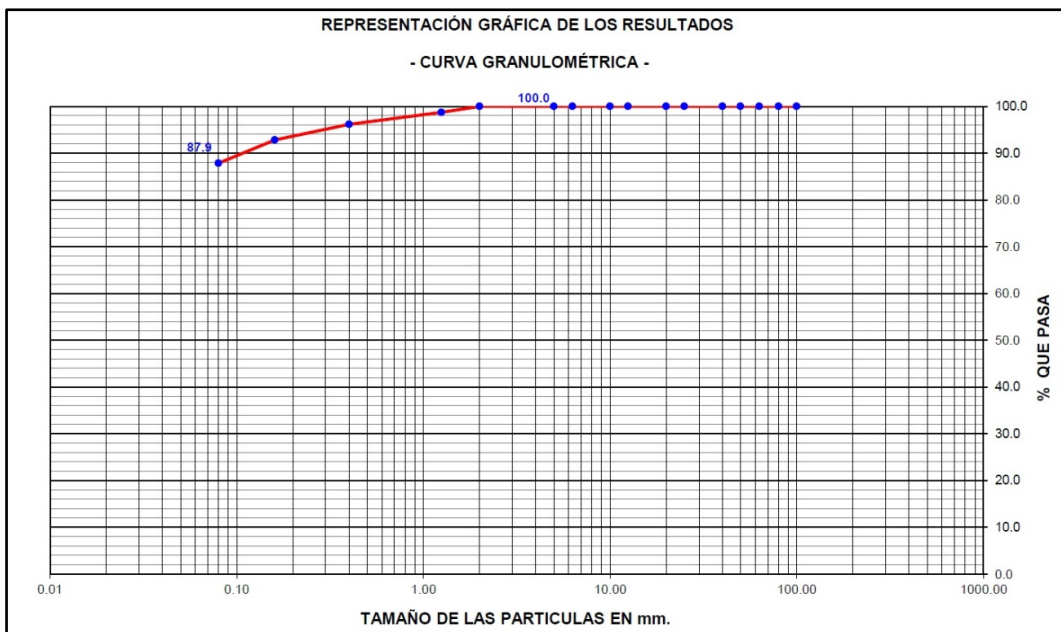


Figura 7.2.22. Curva granulométrica de la muestra de caliza margosa. DIT14-1001.



Figura 7.2.23. Distribución granulométrica de la muestra de caliza margosa. DIT14.1001.

7.2.5 Ensayos Proctor Modificado

7.2.5.1 Generalidades

Se realizaron ensayos de compactación Proctor Modificado a las muestras seleccionadas para esta zona de desmonte.

Éste es un ensayo de referencia, que sirve para determinar las posibilidades del suelo para adquirir una densidad en función de la humedad de amasado de la probeta y de la energía con la que se compacta aquella (Morilla, 2012). Se expresa en un gráfico de Densidad seca (en ordenadas) y Humedad (en abcisas).

Las características de las compactaciones realizadas se expresan en la Tabla 7.2.9.

CARACTERÍSTICAS DE LA COMPACTACIÓN	
Volumen del molde	87.1 cm ³
Nº de capas	5
Peso de la maza	1500 g
Nº golpes / capa	15
Altura de caída	20 cm

Tabla 7.2.9. Características de la compactación.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

Los resultados que arroja este ensayo son la humedad óptima y la densidad máxima seca de la muestra (Tabla 7.2.10).

	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (g/cm ³)
DIT14-201	14.4	1.850
DIT14-601	23.9	1.522
DIT14-1001	15.4	1.820

Tabla 7.2.10. Resultados medios de los ensayos Proctor Modificado.

7.2.5.2 DIT14-201: Alcoy

Los resultados que arroja este ensayo son la humedad óptima y la densidad máxima seca de la muestra, que para el caso de las margas arcillosas ensayadas presentan valores medios representativos de:

$$w_{opt} = 14.4 \%$$

$$\gamma_{dm\acute{a}x} = 1.850 \text{ g/cm}^3$$

Tal como se observa en la figura 7.2.24, la densidad seca máxima corresponde al máximo de la curva humedad – densidad seca, mientras que la humedad óptima se obtiene de la intersección de las rectas que se aproximan a las pendientes de la curva.

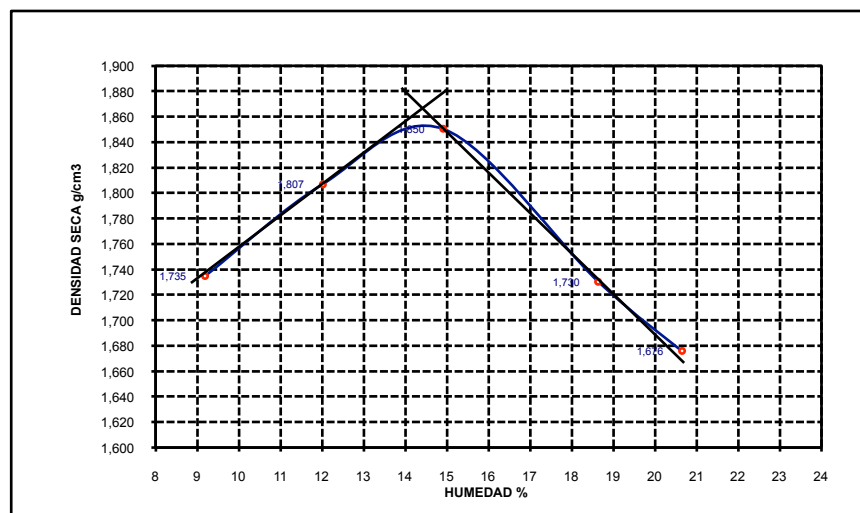


Figura 7.2.24. Ejemplo de la relación entre densidad seca y humedad. DIT14-201.

El valor de la humedad óptima de un suelo es un parámetro importante en la ingeniería, ya que si la comparamos con la humedad natural, es posible predecir el comportamiento que el suelo va a tener ante procesos de extracción y compactación, tal como afirma Morillas (2012):

“Si la humedad natural de un suelo es superior a la humedad óptima, su extracción requerirá operaciones adicionales de oreo, secado o estabilización, lo que encarecerá el proceso y además

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

existe el riesgo de que, si no se adopta un adecuado sistema de drenaje subterráneo, el suelo extraído y compactado, aumente su humedad con el tiempo disminuyendo su resistencia mecánica.

Si por el contrario, como en el caso que nos ocupa, la humedad natural es inferior a la humedad óptima, será necesario humectar el suelo, para utilizarlo en las obras, lo que es muy frecuente en la mayoría de los casos, y es un proceso barato: además el suelo no tendrá una tendencia natural a adquirir más humedad de la empleada en la compactación, aunque siempre es conveniente un adecuado sistema de drenaje subterráneo”.

Un parámetro que es bastante interesante es el de la densidad relativa (D_r), ya que indica el grado de compactación de los suelos entre las densidades máxima y mínima:

$$DR = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} - e_{min}} \cdot 100 = \frac{\gamma_d \min - \gamma_d}{\gamma_d \min - \gamma_d \max} \cdot 100 = \frac{\gamma_d \max \cdot (\gamma_d - \gamma_d \min)}{\gamma_d \max - \gamma_d \min} \cdot 100$$

donde:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

e: índice de poros,

V_v : Volumen de huecos

V_s : Volumen de sólidos.

La densidad relativa varía entre 0 (e_{max} , $\gamma_d \min$) y 100 (e_{min} , $\gamma_d \max$).

Las densidades secas mínimas ($\gamma_d \min$) se obtuvieron realizando el ensayo especificado en la norma NLT-204/72 “Determinación de la densidad mínima de una arena” y los resultados obtenidos están en el entorno de $\gamma_d \min = 1.35 \text{ g/cm}^3$.

Por su parte la densidad seca máxima ($\gamma_d \max$) se obtuvo realizando una variante del ensayo especificado en la norma NLT-205/91 “Determinación de la densidad máxima de una arena por el método del apisonado”. Aunque la norma indica que la compactación para la realización de este ensayo se ha de realizar sobre muestra seca, se realizó con muestra humectada a la humedad óptima, obteniéndose valores de densidad máxima, $\gamma_{max}(w_{opt}=14.4 \%)$, de 2.20 g/cm^3 , a partir de la cual es posible obtener la densidad seca máxima:

$$\gamma_d \max = 2.201 + 14.4 \cdot 100 = 1.92 \text{ g/cm}^3$$

7.2.5.3 DIT14- 601: Montaberner

Se obtuvo la humedad óptima y la densidad máxima seca de las muestras, procediendo de la misma forma que con las muestras anteriores, siguiendo las especificaciones de la norma NLT-108/91 “Ensayo de compactación. Proctor modificado”, dando los siguientes valores representativos, tal como se observa en la Figura 7.1.25:

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

$$w_{opt} = 23.9 \%$$

$$\gamma_{d\ max} = 1.519\ g/cm^3$$

La humedad óptima de estos suelos es muy superior a su humedad natural, que tiene un valor medio de 8.3 %, por tanto, será necesario humectarlo para utilizarlo en obra.

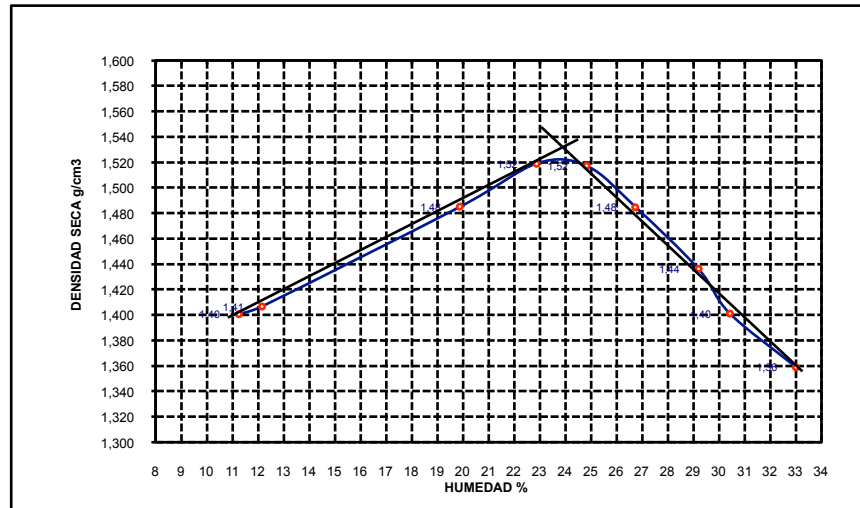


Figura 7.2.25. Ejemplo de Relación entre densidad seca y humedad. DIT14-601.

7.2.5.4 DIT14- 1001: Benisa

Se obtuvo la humedad óptima y la densidad máxima seca de las muestras, procediendo de la misma forma que con las muestras anteriores, siguiendo las especificaciones de la norma NLT-108/91 "Ensayo de compactación. Proctor modificado", dando los siguientes valores representativos, tal como se observa en la Figura 7.1.26:

$$w_{opt} = 15.4 \%$$

$$\gamma_{d\ max} = 1.82\ g/cm^3$$

La humedad óptima de este suelo es algo inferior a su humedad natural, que tiene un valor de 19.4 %, por lo que su extracción podría requerir operaciones adicionales de oreo, secado o estabilización.

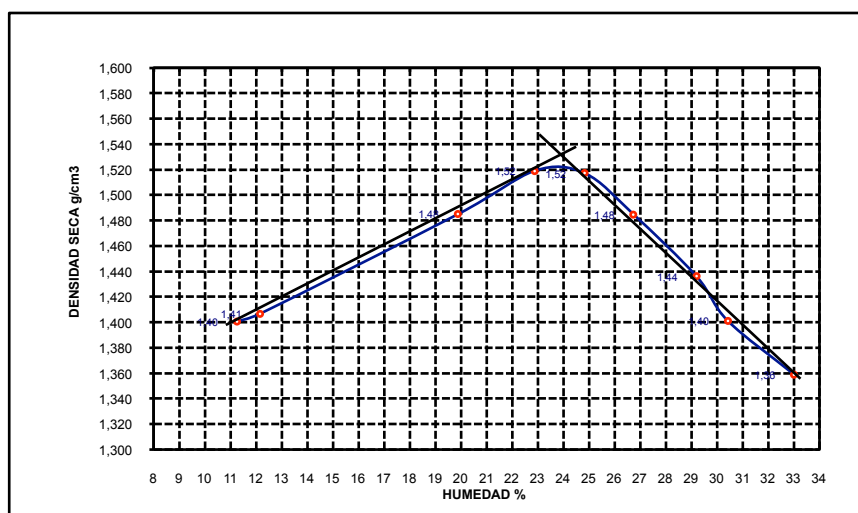


Figura 7.2.26. Ejemplo de Relación entre densidad seca y humedad. DIT14-1001.

7.2.6. Peso específico de las partículas

Se determinó el peso específico de las partículas del suelo siguiendo las especificaciones de la norma UNE 103302: 1994 “Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo”.

Así, para cada una de las muestras estudiadas, se realizaron tres determinaciones de la densidad relativa de las partículas con el método del picnómetro y se calculó la media aritmética (Tabla 7.2.11).

Este valor se corrige multiplicándolo por el factor K_1 que depende de la temperatura, dado que el resultado de densidad relativa de las partículas que se obtiene va referido a una temperatura de 20 °C. En este caso, la temperatura en el laboratorio durante la realización del ensayo era de 18 °C, y por lo tanto, $K_1 = 1$ (Tabla 7.2.12).

		1	2	3
DENSIDAD RELATIVA DE LAS PARTÍCULAS	G'	2.644	2.639	2.643
G' VALOR MEDIO		2.642		

Tabla 7.2.11. Ejemplo de determinación del peso específico de las partículas. DIT14-201.

Por lo tanto la densidad relativa de las partículas de estas muestras es:

$$G = G' \cdot K_1 = 2.642 \cdot 1.000 = 2.642 \text{ g/cm}^3$$

VALORES DE K_1 A DIFERENTES TEMPERATURAS		
Temperatura °C	Coefficiente K_1	Densidad Agua (g/cm ³)
<20	1.0000	0.9982343
21	0.9998	0.9980233
22	0.9996	0.9978019
23	0.9993	0.9975702
24	0.9991	0.9973286
25	0.9988	0.9970770

Tabla 7.2.12. Valores del coeficiente K_1 a diferentes temperaturas.

Los resultados medios de este ensayo para las distintas muestras se presentan en la Tabla 7.2.13.

	DIT14-201	DIT14-601	DIT14-1001
G_s	2.642	2.633	2.689

Tabla 7.2.13. Valores medios del peso específico de las partículas.

7.2.7 Materia orgánica, sulfatos y carbonatos

Los porcentajes medios de materia orgánica, sulfatos solubles y carbonatos de los suelos ensayados se muestran en la Tabla 7.2.14. Las cantidades de materia orgánica encontradas en los suelos ensayados son muy bajas, máxime si tenemos en cuenta que algunas de las muestras han sido extraídas de la superficie de los taludes, donde se prevé que la concentración de materia orgánica es superior que a mayor profundidad. A su vez la cantidad de sulfatos solubles en los suelos es prácticamente inexistente.

	M.O. (%)	CaCO ₃ (%)	SO ₃ ⁼ (%)
DIT14-201	0.15	60.4	0.02
DIT14-601	0.39	49.7	0.35
DIT14-1001: Marga calcárea	0.12	69.1	--
DIT14-1001: Caliza margosa		75.5	

Tabla 7.2.14. Porcentajes de materia orgánica, carbonatos y sulfatos solubles en las muestras ensayadas.

Los altos porcentajes de carbonatos hallados en las muestras confirman que los suelos ensayados se tratan de margas, uno de los suelos más abundantes en la naturaleza, formado de las mezclas de caliza y arcilla. La nomenclatura de estas mezclas ha sido objeto de numerosas clasificaciones según los autores, pero la más comúnmente aceptada es la reflejada en la tabla 7.2.15.

DENOMINACIÓN	PORCENTAJE DE CALIZA	PORCENTAJE DE ARCILLA
CALIZA PURA O CALCITA	100 A 95	0 A 5
CALIZA MARGOSA	95 A 85	5 A 15
CALIZA MUY MARGOSA	85 A 75	15 A 25
MALGA CALCÁREA	75 A 65	25 A 35
MARGA	65 A 35	35 A 65
MARGA ARCILLOSA	35 A 25	65 A 75
MARGA MUY ARCILLOSA	25 A 15	75 A 85
ARCILLA MARGOSA	15 A 5	85 A 95
ARCILLA PURA	5 A 0	95 A 100

Tabla 7.2.15. Nomenclatura de las margas en función de sus porcentajes de caliza y arcilla (Morilla, 2012).

Según esta nomenclatura, los suelos procedentes de Alcoy y Montaberner (DIT14-201 y DIT14-601) se tratarían de margas, mientras que las muestras procedentes de Benisa (DIT14-1001), se tratarían de margas calcáreas y calizas muy margosas, tal y como las hemos denominado para diferenciarlas.

7.2.8 Conductividad eléctrica (CE/TDS)

Los resultados obtenidos del ensayo de determinación de la conductividad eléctrica de todas las muestras se muestran en la Tabla 7.2.16. Cabe comentar que el valor obtenido de la conductividad depende de la cantidad de sales solubles que contiene dicha muestra.

	TEMPERATURA (°C)	pH	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	
			CE (μS/cm)	DTS (mg/L)
<i>DIT14-201</i>	20.7	7.8	120	60
<i>DIT14-1001: Marga calcárea</i>	19.8	8.2	430	215
<i>DIT14-1001: Caliza margosa</i>	19.8	8.3	290	140

Tabla 7.2.16. Valores de conductividad eléctrica en las muestras ensayadas.

7.2.9 Petrografía y microscopia

Con el objetivo de conocer la estructura interna de estos materiales se realizó la microscopía de varias de las muestras, procedente de Alcoy y se obteniéndose las imágenes reflejadas en las Figuras 7.2.27 a 7.2.32.

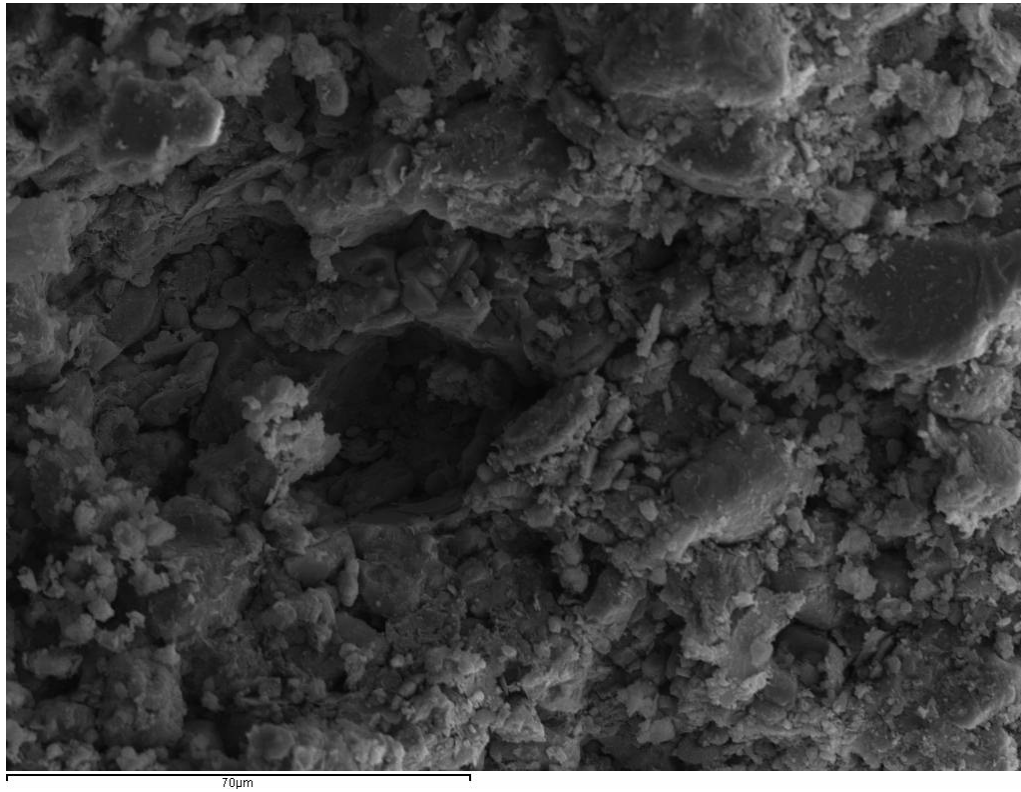


Figura 7.2.27. Microfábrica en panal de abeja. Se corresponde con una estructura abierta formada por flóculos de partículas de arcilla unidas entre sí por fuerzas de adhesión.

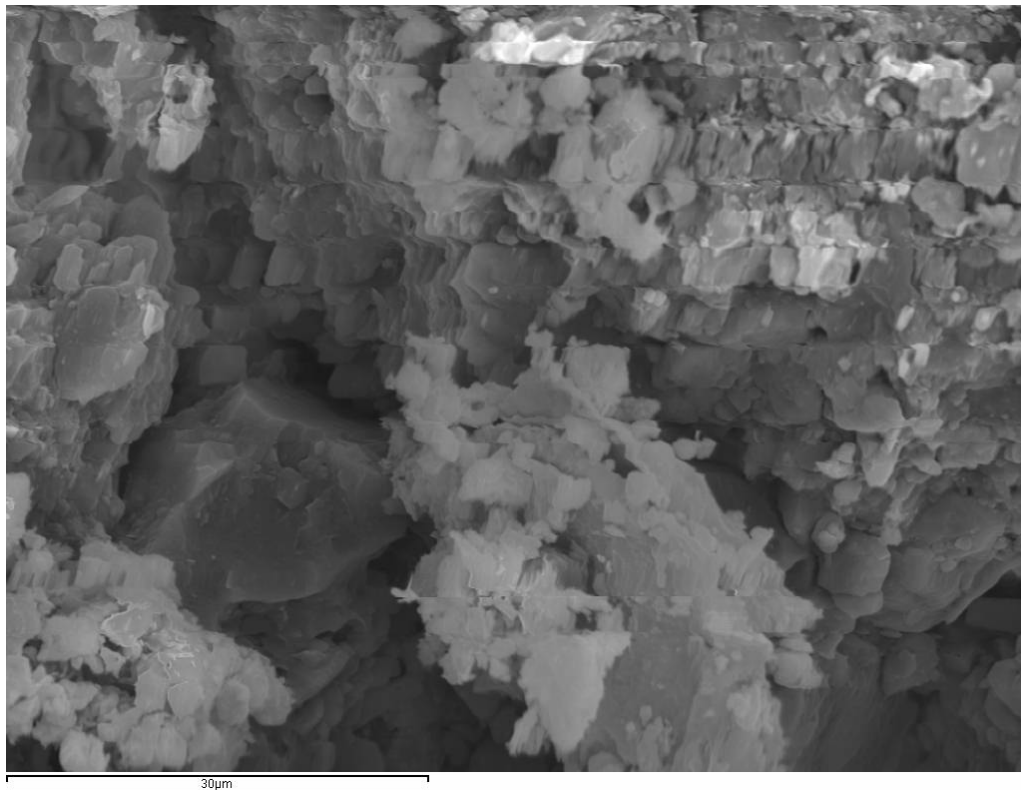


Figura 7.2.28. Cristales de calcita que constituyen el cemento carbonatado, relleno los poros intercomunicados.

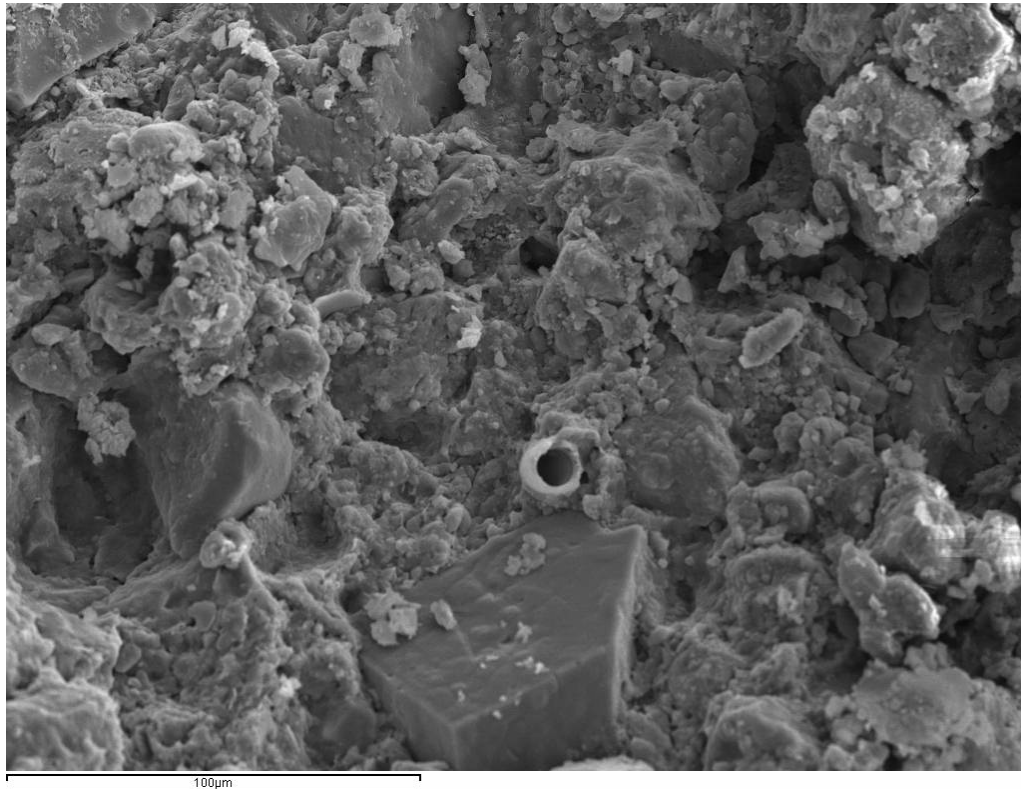


Figura 7.2.29. Vista en detalle de los cristales calcíticos y de huellas de raíces.

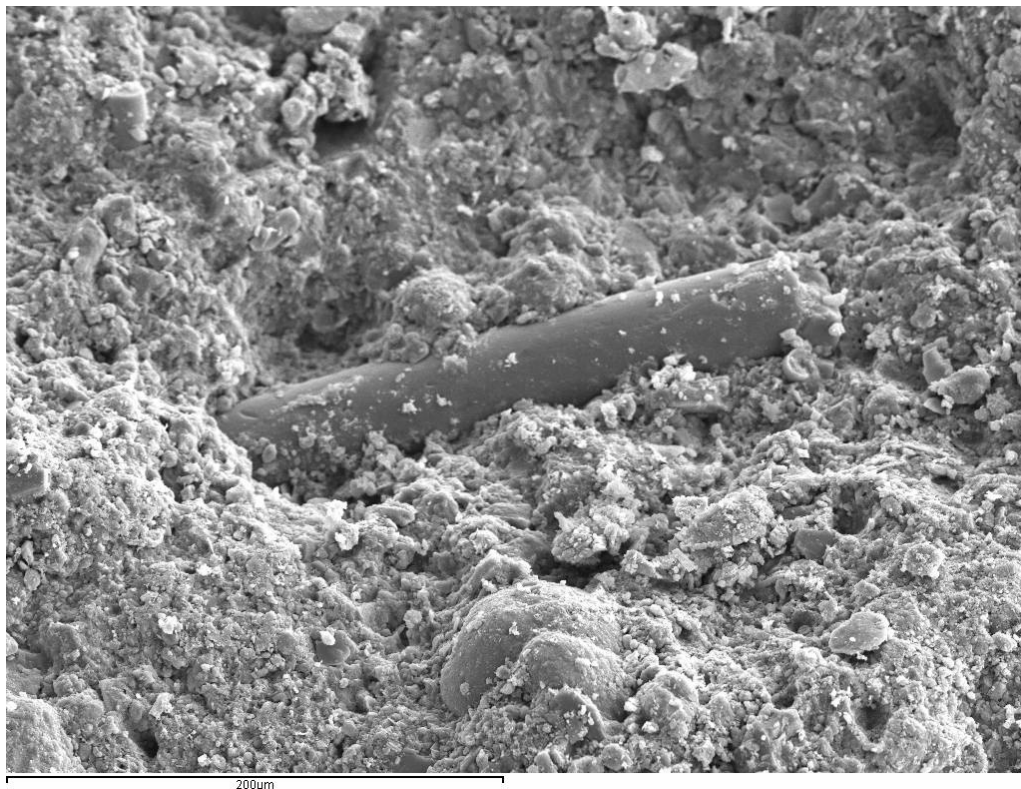


Figura 7.2.30. Vista de perfil de un fragmento de raíz, dentro de una microfábrica turbostática o regular, caracterizada por la presencia de una matriz arcillosa continua y compacta, estructura muy densa y sin orientación preferente.

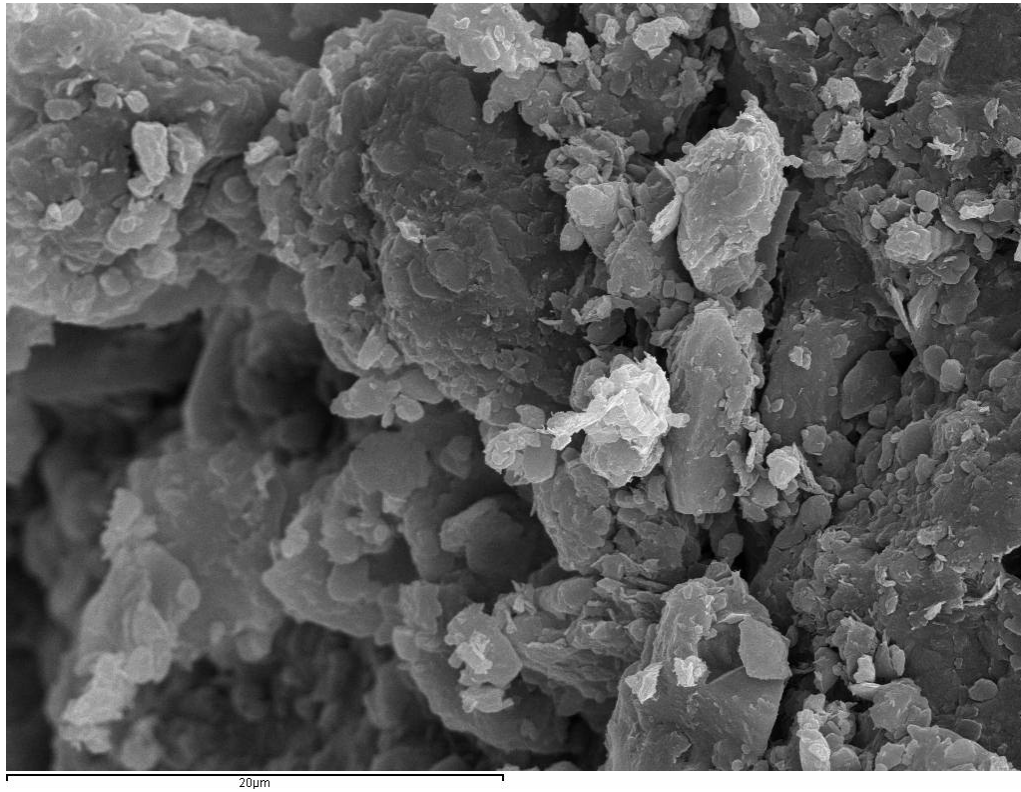


Figura 7.2.31. Microfábrica laminar u orientada. Se corresponde con una estructura compacta y anisótropa, constituida por una matriz homogénea formada por arcillas orientadas según una dirección preferente. También se observan cristales calcíticos constituyentes del cemento carbonatado.

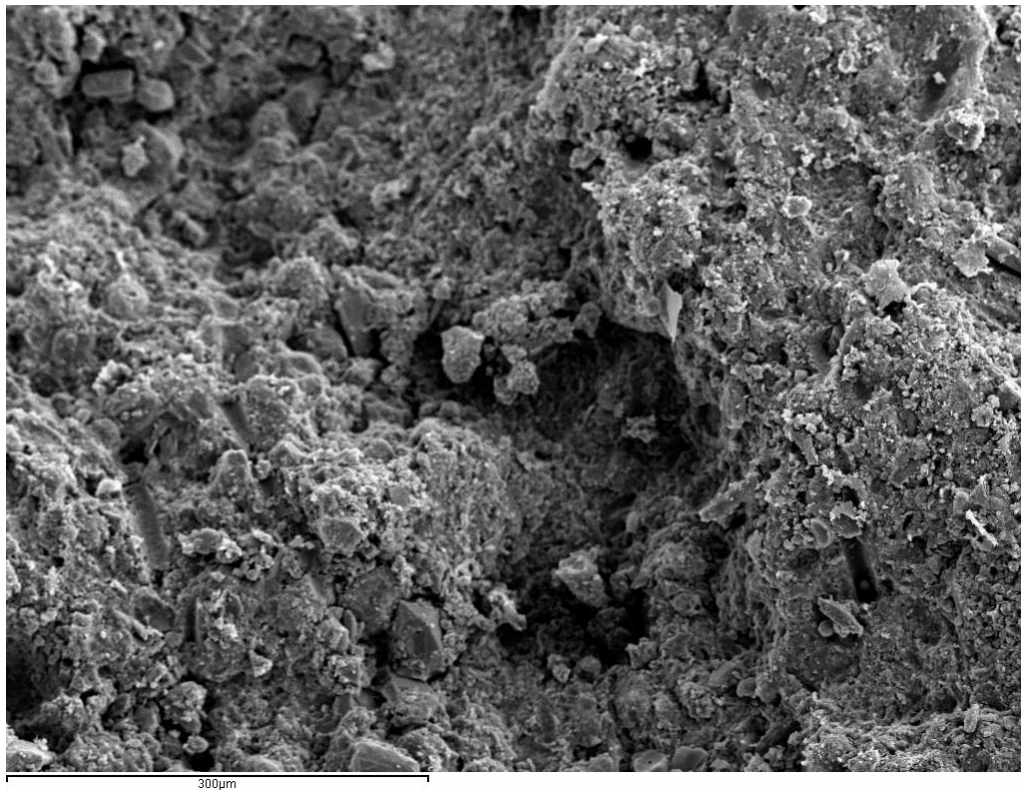


Figura 7.2.32. Se pueden apreciar huellas de raíces, y disolución parcial del cemento carbonatado.

7.3. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE SUELOS

7.3.1 Ensayos de compresión simple en suelos

7.3.1.1 DIT14-201: Alcoy

Las probetas fabricadas para el ensayo Proctor Modificado se llevaron a rotura por compresión simple. La Tabla 7.3.1 muestra la resistencia a compresión simple y la deformación en rotura de algunas de ellas.

w(%)	q _u (kPa)	ε _{rotura} (%)
9.3	426	0.5
12.3	751	2.0
14.9	666	5.9
15.2	577	6.2
19.0	170	12.8
21.2	117	19.1

Tabla 7.3.1. Resistencia a compresión simple y deformación en rotura de las probetas ensayadas.

A continuación se muestran las gráficas tensión – deformación de algunas de las probetas (Figuras 7.3.1 a 7.3.6), que incluyen un esquema de la forma de la rotura y se clasifica la consistencia de las arcillas en función de su resistencia a compresión simple (Terzaghi y Peck, 1957; Tabla 7.3.2) y su comportamiento en rotura (Tsebotarioff, 1958; Tabla 7.3.3).

CONSISTENCIA DE LAS ARCILLAS	RESISTENCIA Q _u EN MPA	N ₃₀ DEL SPT
MUY BLANDA	< 0.025	< 2
BLANDA	0.025 – 0.050	2 -4
POCO COMPACTA	0.050 – 0.100	4 – 8
COMPACTA	0.100 – 0.200	8 – 15
MUY COMPACTA	0.200 – 0.400	15 – 30
DURA	> 0.400	> 30

Tabla 7.3.2.. Consistencia de las arcillas en función de su resistencia a compresión simple y su valor N30 del SPT (Terzagui y Peck, 1957).

TIPO DE ARCILLA	DEFORMACIÓN EN ROTURA ε _f EN %
FRÁGIL	3 - 8
SEMIFRÁGIL	8 - 14
PLÁSTICA	14 - 20

Tabla 7.3.3. Clasificación de las arcillas en función de su deformación hasta rotura (Tsebotarioff, 1958).

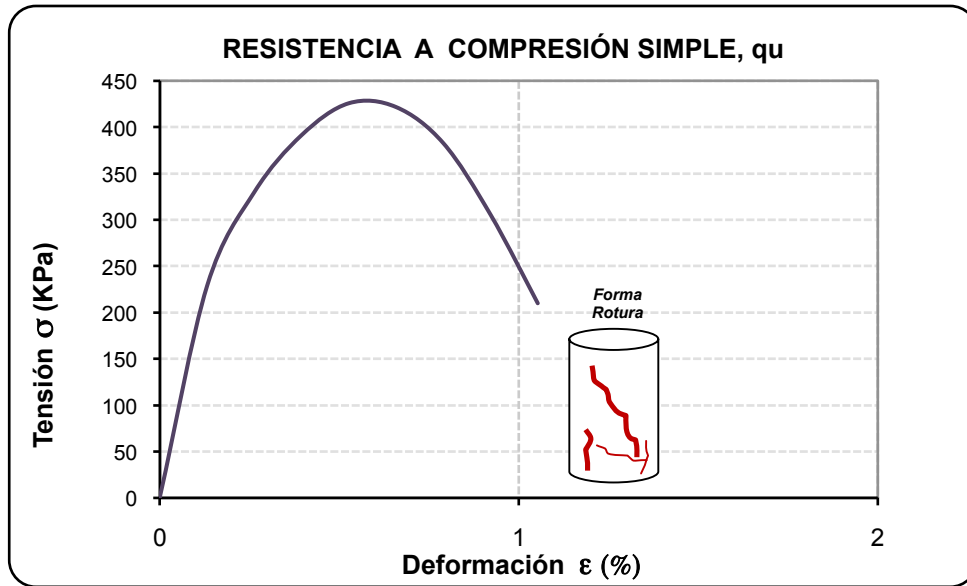


Figura 7.3.1. Gráfica tensión-deformación para una probeta de 9.3 % de humedad. DIT14-201.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y de Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 9.3 % tiene consistencia dura y un comportamiento en rotura muy frágil.

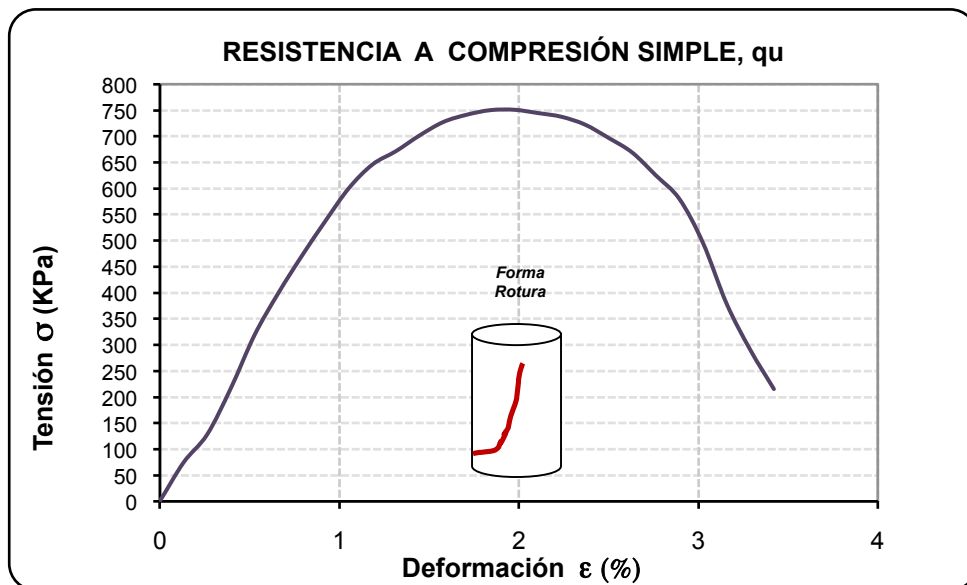


Figura 7.3.2. Gráfica tensión-deformación para una probeta de 12.3 % de humedad. DIT14-201.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y de Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 12.3 % tiene consistencia dura y un comportamiento en rotura muy frágil.

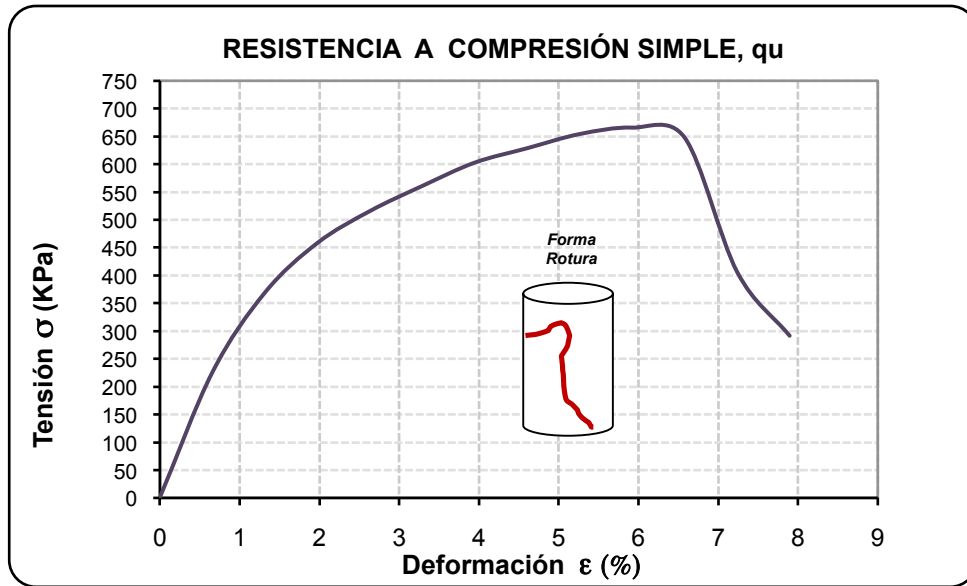


Figura 7.3.3. Gráfica tensión-deformación para una probeta de 14.9 % de humedad. DIT14-201.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y de Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 14.9 % tiene consistencia dura y un comportamiento en rotura frágil.

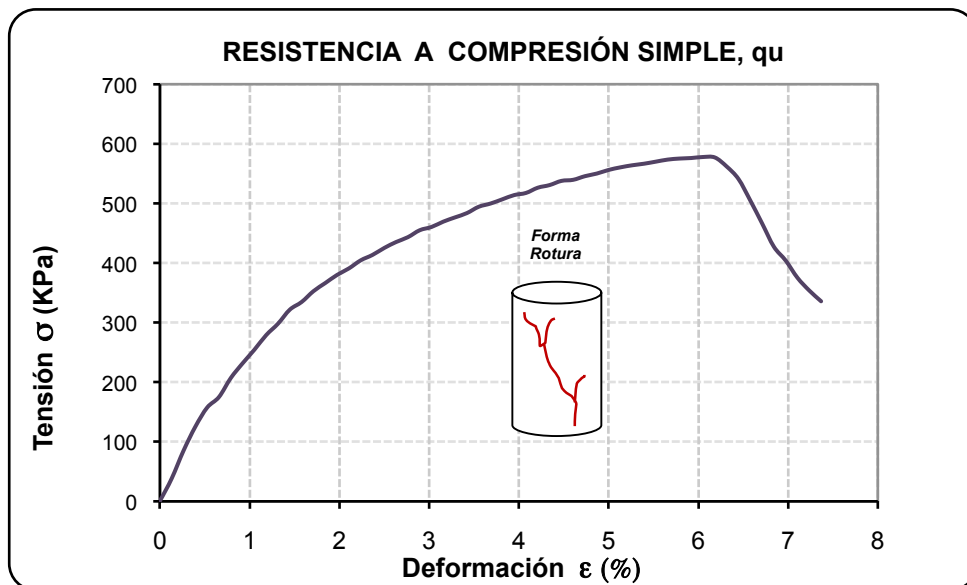


Figura 7.3.4. Gráfica tensión-deformación para una probeta de 15.2 % de humedad. DIT14-201.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y de Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 15.2 % tiene una consistencia dura y un comportamiento en rotura frágil.

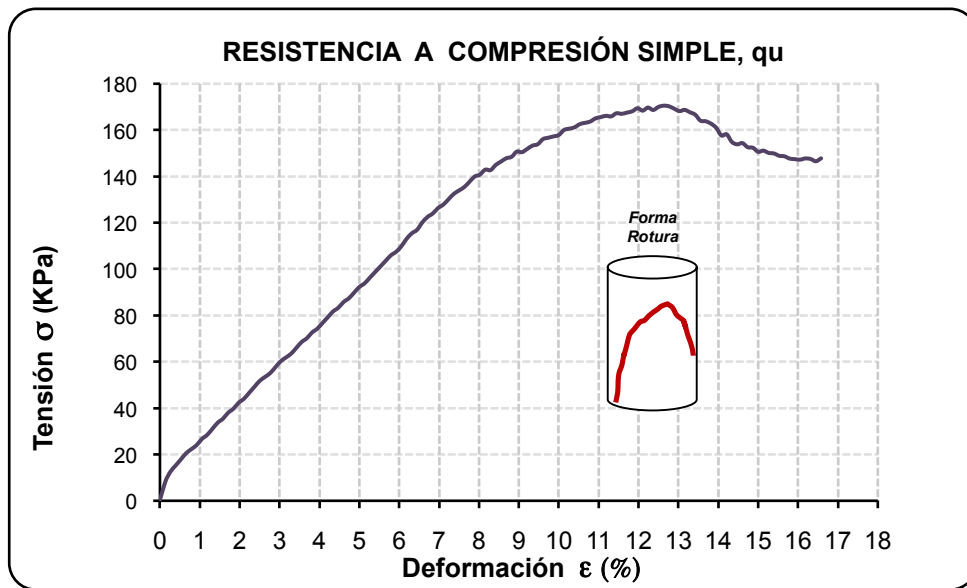


Figura 7.3.5. Gráfica tensión-deformación para una probeta de 19.0 % de humedad. DIT14-201.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 19.0% tiene una consistencia compacta y un comportamiento en rotura semifrágil.

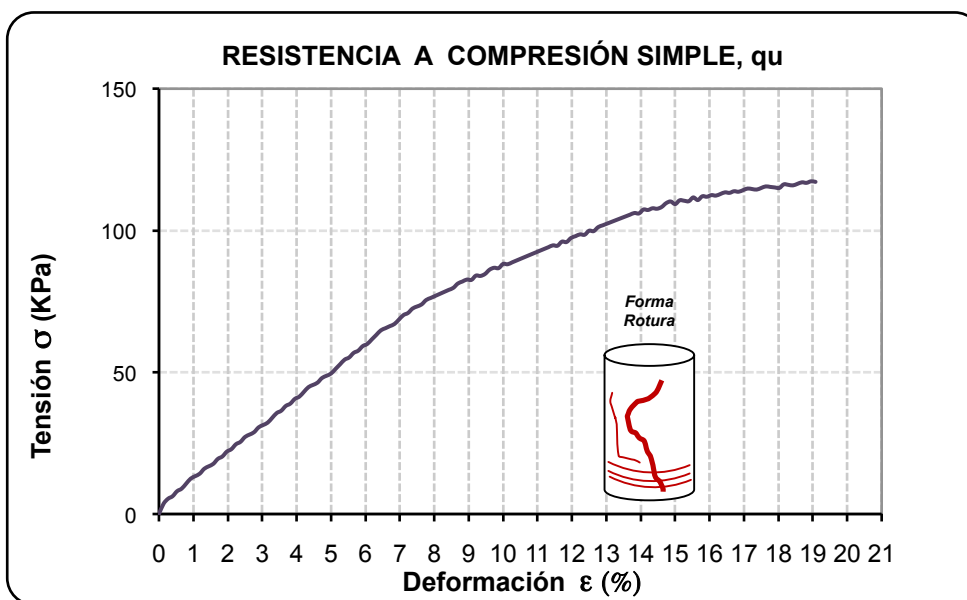


Figura 7.3.6. Gráfica tensión-deformación para una probeta de 21.2 % de humedad. DIT14-201.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 21.2 % tiene una consistencia compacta y un comportamiento en rotura plástico.

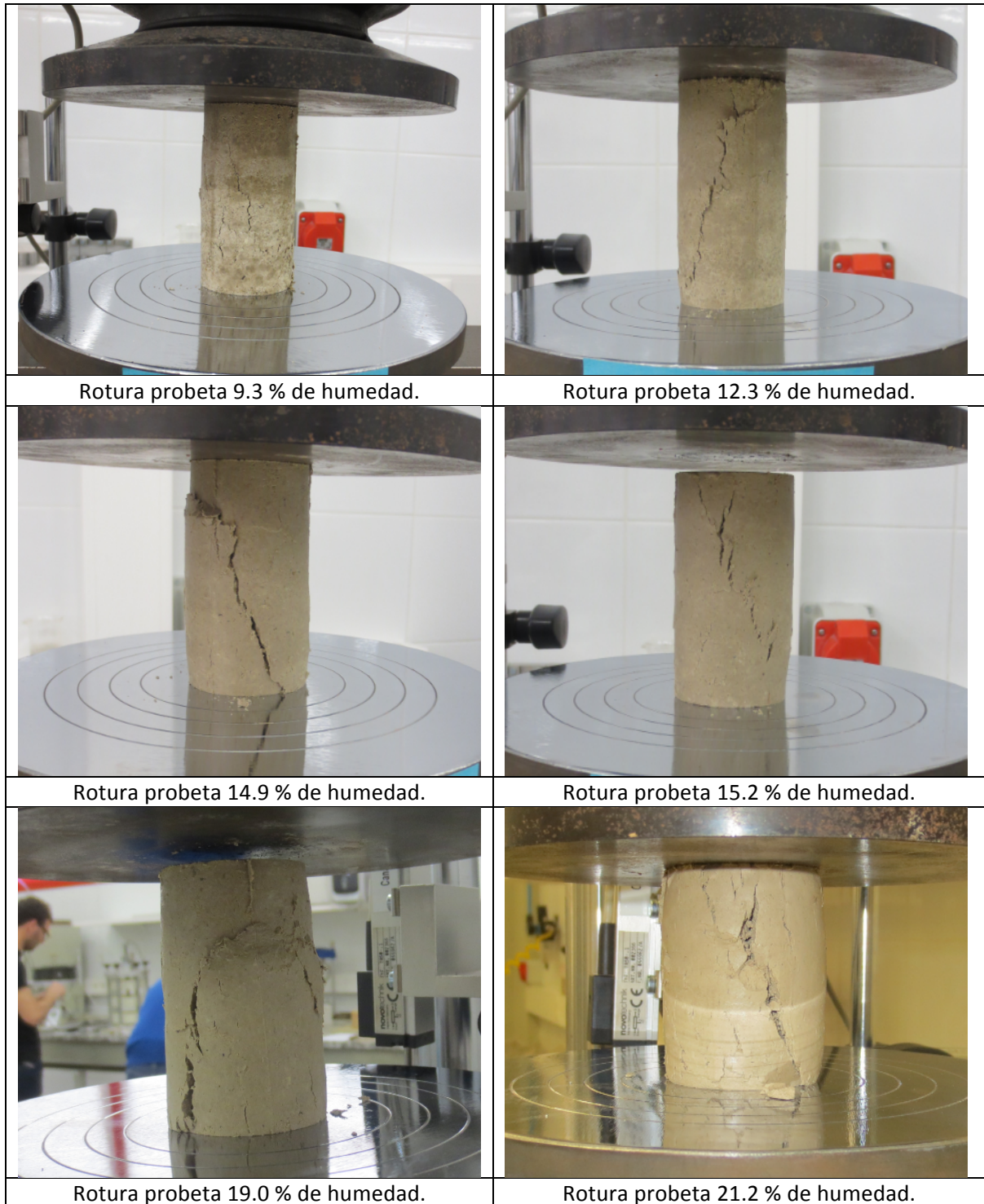


Figura 7.3.7. Rotura de las probetas a compresión simple. DIT14-201.

Tal como se observa en la Figura 7.3.7, y de acuerdo con la clasificación de Tsebotiaroff, todas las probetas, salvo la compactada a una humedad de 21.2 % tienen un comportamiento en rotura frágil o semifrágil, con planos de rotura muy bien definidos. La de mayor humedad, pese a dar

lugar en su rotura a un plano bien definido, sufre durante el proceso de carga un abombamiento propio de materiales más plásticos. En la figura 7.3.8 semuestra la relación entre la resistencia a compresión simple y la humedad natural en las muestras ensayadas.

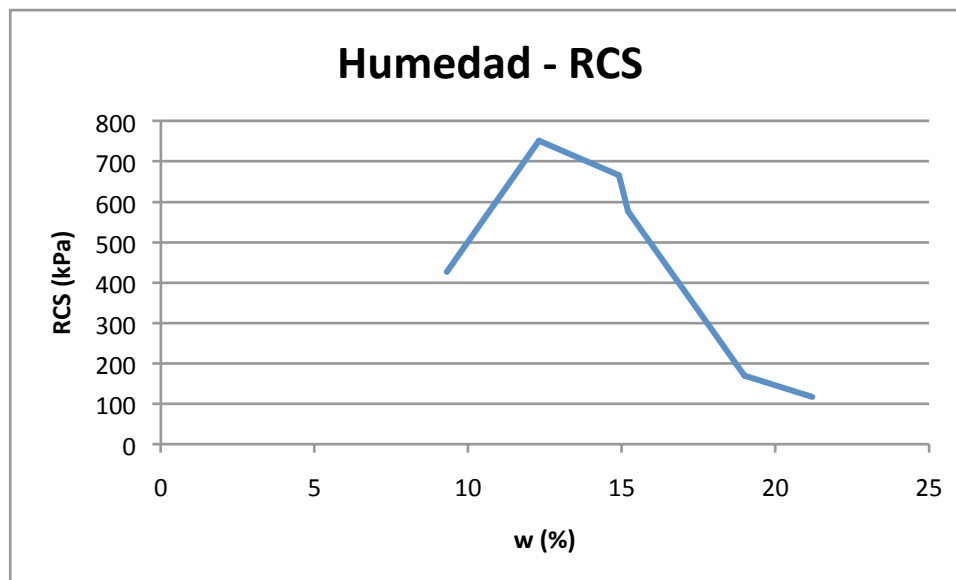


Figura 7.3.8. Relación de la humedad con la resistencia a compresión simple. DIT14-201.

7.3.1.2 DIT14- 601: Montaberner

Las probetas fabricadas para el ensayo Proctor Modificado se llevaron a rotura por compresión simple. Al igual que para el caso anterior, la Tabla 7.3.4 muestra la resistencia a compresión simple y la deformación en rotura de algunas de ellas.

w(%)	q_u (kPa)	ϵ_{rotura} (%)
11.2	276	1.1
12.2	426	1.4
19.9	661	1.9
22.9	670	2.0
24.8	484	2.7
26.7	314	5.7
29.2	192	7.4
30.4	120	8.6
33.0	77	12.8

Tabla 7.3.4. Resistencia a compresión simple y deformación en rotura de las probetas ensayadas.

A continuación se muestran las gráficas tensión – deformación de dichas probetas (Figuras 7.3.9 a 7.3.17), que incluyen un esquema de la forma de la rotura y se clasifica la consistencia de las arcillas en función de su resistencia a compresión simple (Terzaghi y Peck, 1957) y su

comportamiento en rotura (Tsebotarioff, 1958), según se describe en la Tabla 7.3.2 y la Tabla 7.3.3.

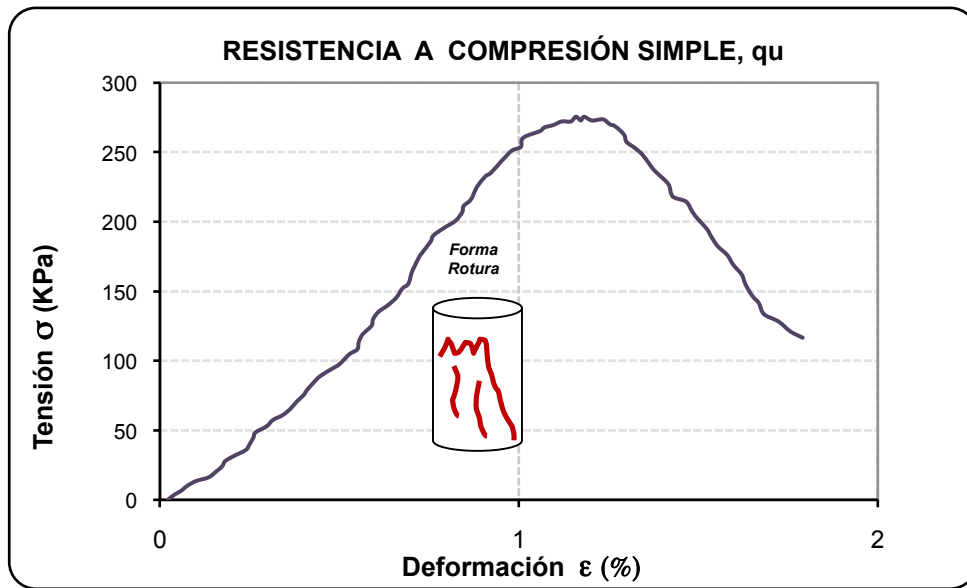


Figura 7.3.9. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 11.2 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 11.2 % tiene una consistencia muy compacta y un comportamiento en rotura muy frágil.

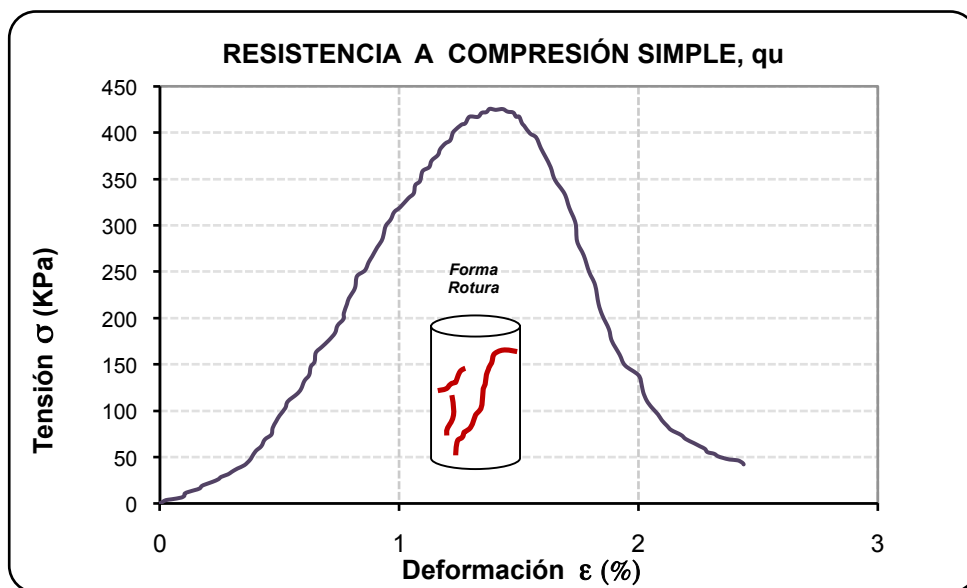


Figura 7.3.10. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 12.2 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 12.2 % tiene una consistencia dura y un comportamiento en rotura muy frágil.

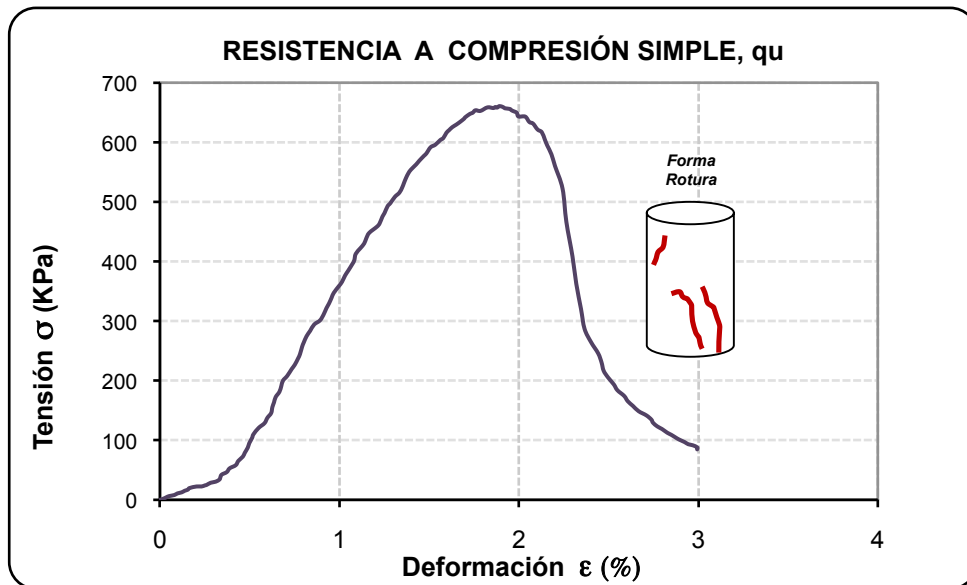


Figura 7.3.11. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 19.9 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 19.9 % tiene una consistencia dura y un comportamiento en rotura muy frágil.

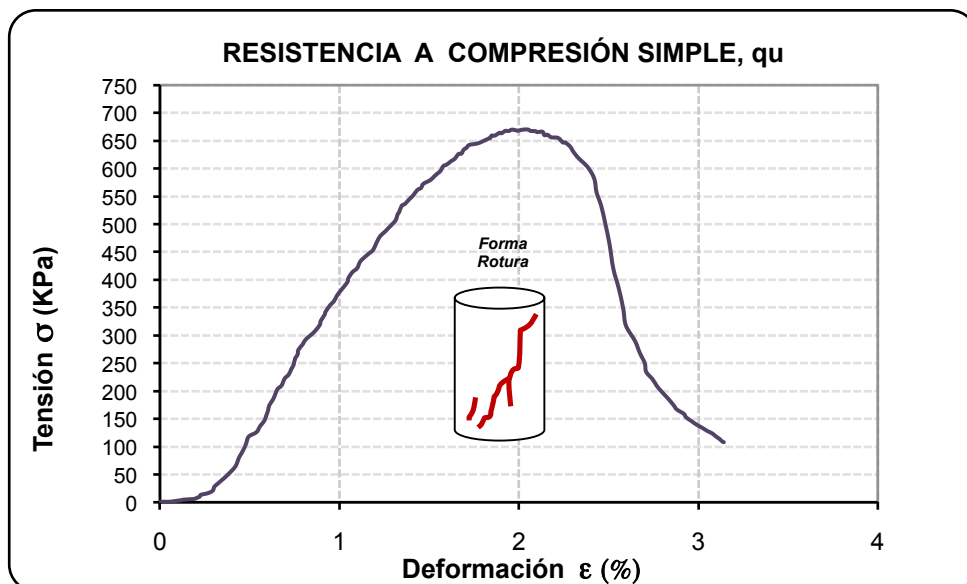


Figura 7.3.12. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 22.9 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 22.9 % tiene una consistencia dura y un comportamiento en rotura muy frágil.

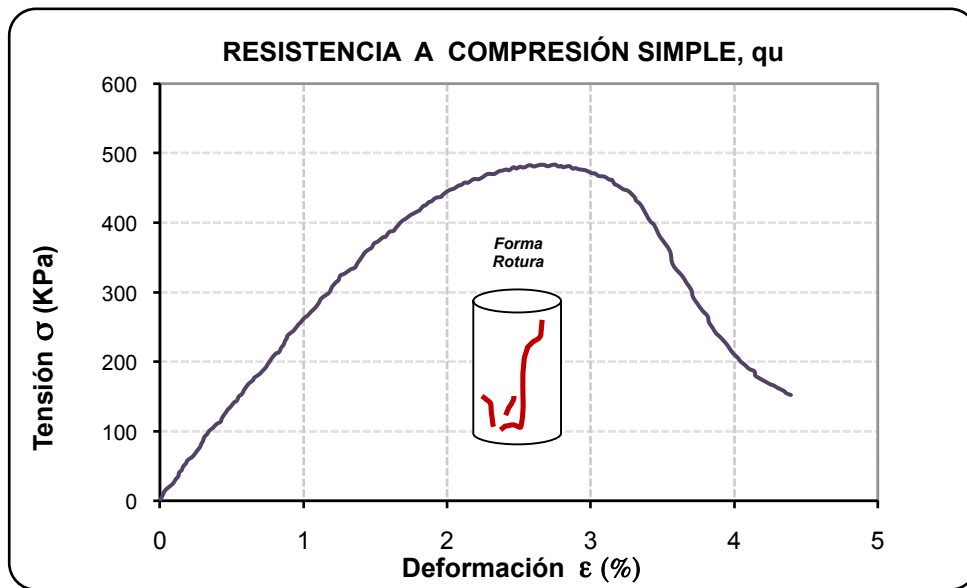


Figura 7.3.13. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 24.8 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 24.8 % tiene una consistencia dura y un comportamiento en rotura muy frágil.

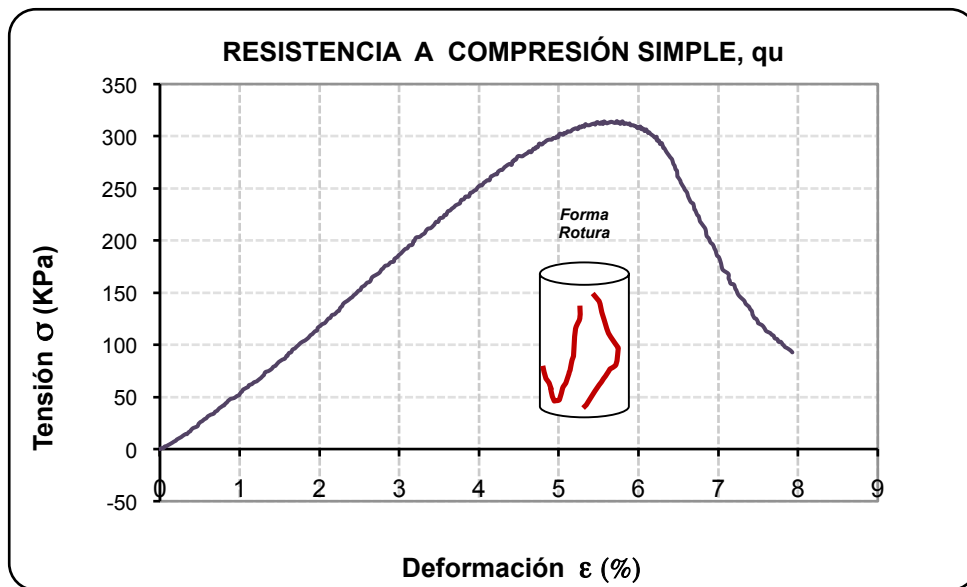


Figura 7.3.14. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 26.7 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 26.7 % tiene una consistencia muy compacta y un comportamiento en rotura frágil.

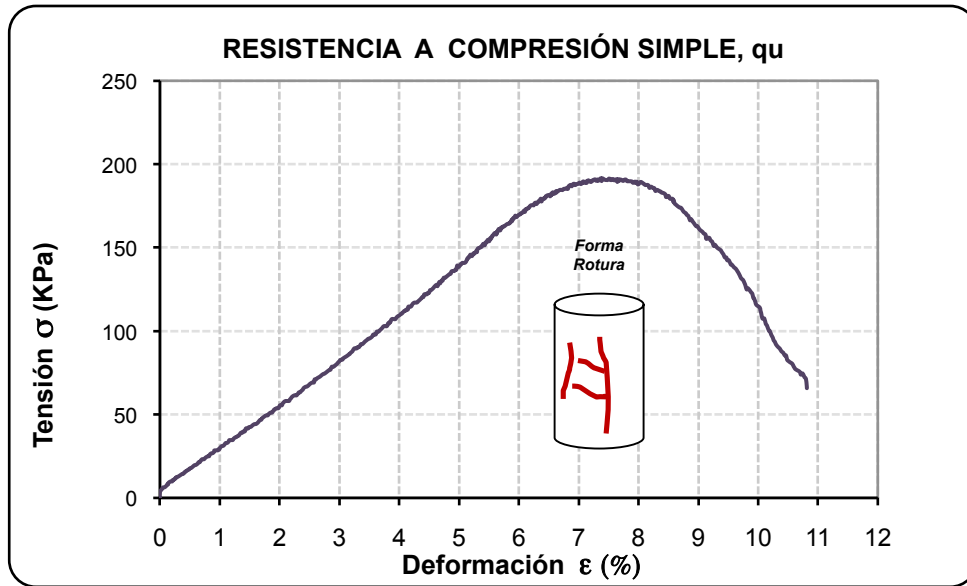


Figura 7.3.15. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 29.2 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 29.2 % tiene una consistencia compacta y un comportamiento en rotura frágil.

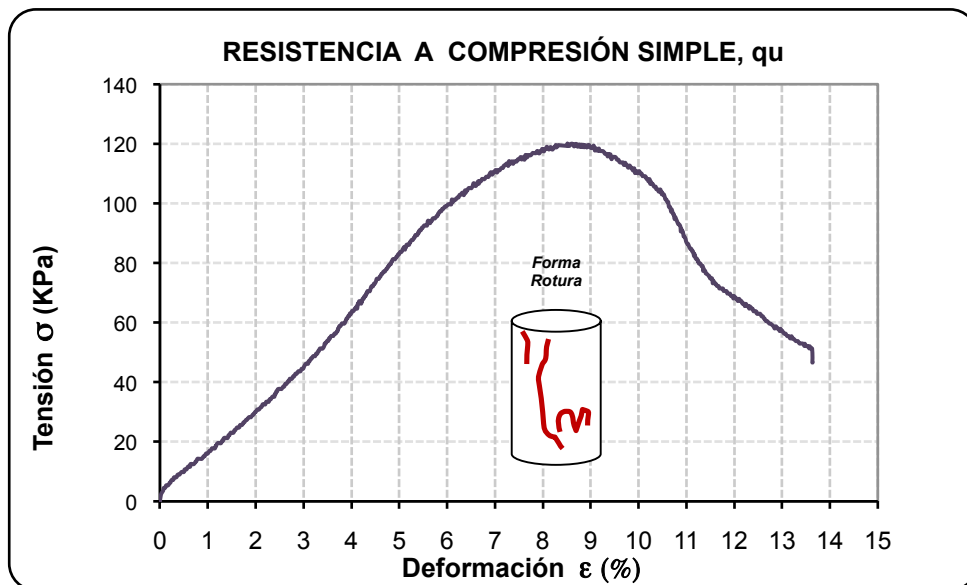


Figura 7.3.16. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 30.4 %. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 30.4 % tiene una consistencia compacta y un comportamiento en rotura semifrágil.

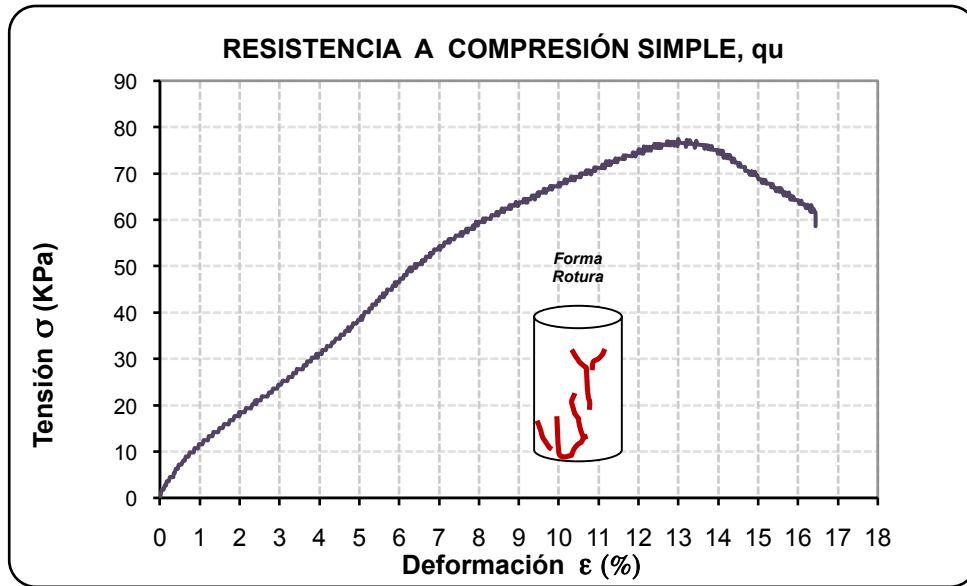


Figura 7.3.17. Gráfica tensión-deformación para una probeta de humedad 33.0. DIT14-601.

Partiendo de las clasificaciones de Terzagui y Peck y Tsebotiaroff, esta probeta compactada con una humedad de 33.0 % tiene una consistencia poco compacta y un comportamiento en rotura semifrágil.

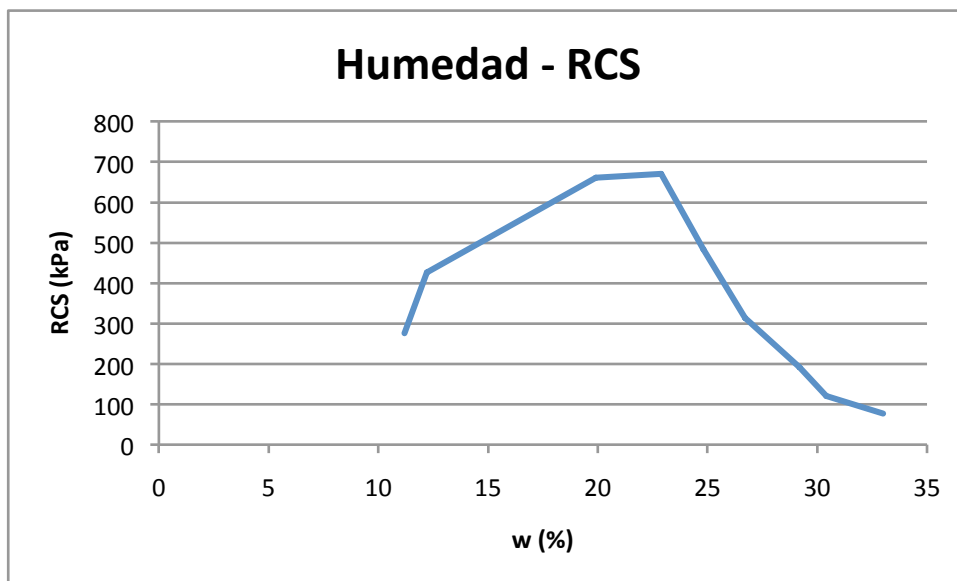


Figura 7.3.18. Relación de la humedad con la resistencia a compresión simple. DIT14-601.

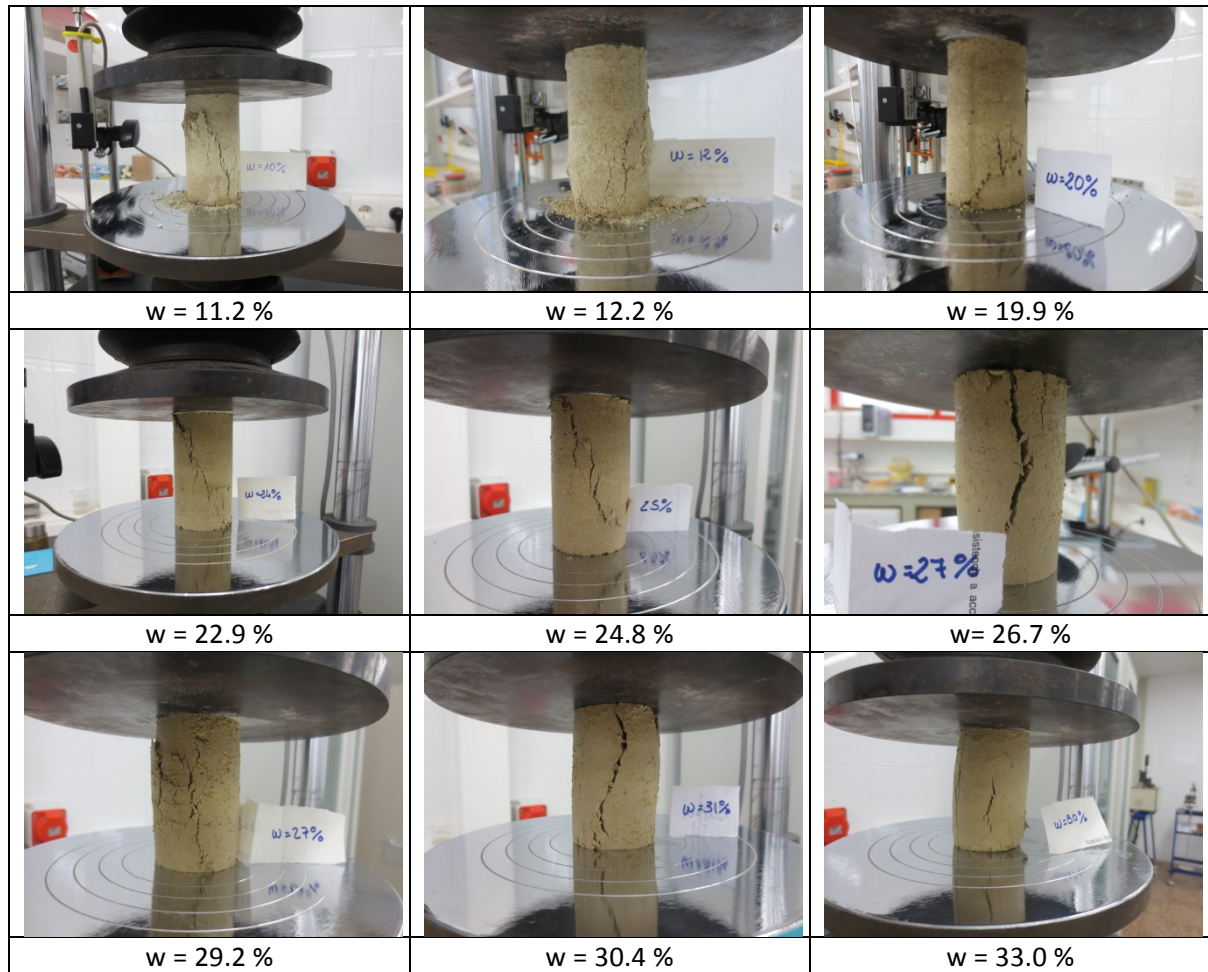


Figura 7.3.19. Rotura de las probetas a compresión simple. DIT14-601.

7.3.2 Ensayos de Corte Directo

7.3.2.1 Generalidades

Se realizaron ensayos de corte directo con la consiguiente determinación de los parámetros resistentes efectivos: el ángulo de rozamiento efectivo (φ') y la cohesión efectiva (c'). Además para las muestras DIT14-1001 procedentes de Montaberner se realizó la determinación del ángulo de rozamiento efectivo residual (φ_r') y de la cohesión efectiva residual (c_r'), mediante la realización de sucesivos ensayos de corte directo a las muestras. Los parámetros medios obtenidos se muestran en la Tabla 7.3.5.

		Criterio 1: Tensiones tangenciales máximas	Criterio 2: Largas deformaciones
DIT14-201	$\varphi' (^{\circ})$	24.0	28.0
	$c' (kPa)$	40.8	0.0
DIT14-691	$\varphi' (^{\circ})$	33.6	32.8
	$c' (kPa)$	20.1	0.0
DIT14-1001	$\varphi' (^{\circ})$	23.2	23.8
	$c' (kPa)$	70.6	54.2
DIT14-1001 RESIDUAL	$\varphi_r' (^{\circ})$	18.9	19.3
	$c_r' (kPa)$	52.7	49.4

Tabla 7.3.5. Parámetros medios de corte de las muestras ensayadas.

7.3.2.2 DIT14-201: Alcoy

Condiciones de ensayo

Se realizaron ensayos de corte directo de 5 escalones de carga, con las siguientes características:

- Muestra remodelada con la humedad óptima y compactada a la energía correspondiente al ensayo del Proctor Modificado.
- Con deformación controlada.
- Con drenaje.
- Con consolidación previa.
- Con velocidad de corte baja.

Fase de saturación

Se introdujo la caja de corte dentro de la bancada y se llenó de agua para saturar la muestra durante 24 horas. Durante este tiempo, se observó la deformación vertical que se iba produciendo en la muestra debido al hinchamiento de la misma y se añadieron pesas ligeras para contrarrestar esta deformación. El peso total añadido es la presión de hinchamiento de la muestra. La Tabla 7.3.6 muestra la presión de hinchamiento de la muestra en cada escalón de carga para una muestra representativa.

Probeta	Escalón de carga (kPa)	Presión de hinchamiento (kPa)	Tensión normal total (kPa)
1	100	9	109
2	200	13	213
3	300	14	314
4	400	10	410
5	500	9	509

Tabla 7.3.6. Escalones de carga y presión de hinchamiento de las muestras seleccionadas. DIT14-201.

Fase de consolidación

Transcurridas al menos 24 horas desde el inicio de la fase de saturación, se añadió el peso vertical correspondiente a cada escalón de carga para iniciar el proceso de consolidación y se mantuvo durante al menos 24 horas registrando las deformaciones verticales que se iban produciendo. La Figura 7.3.20 muestra las curvas de consolidación de todos los escalones de carga.

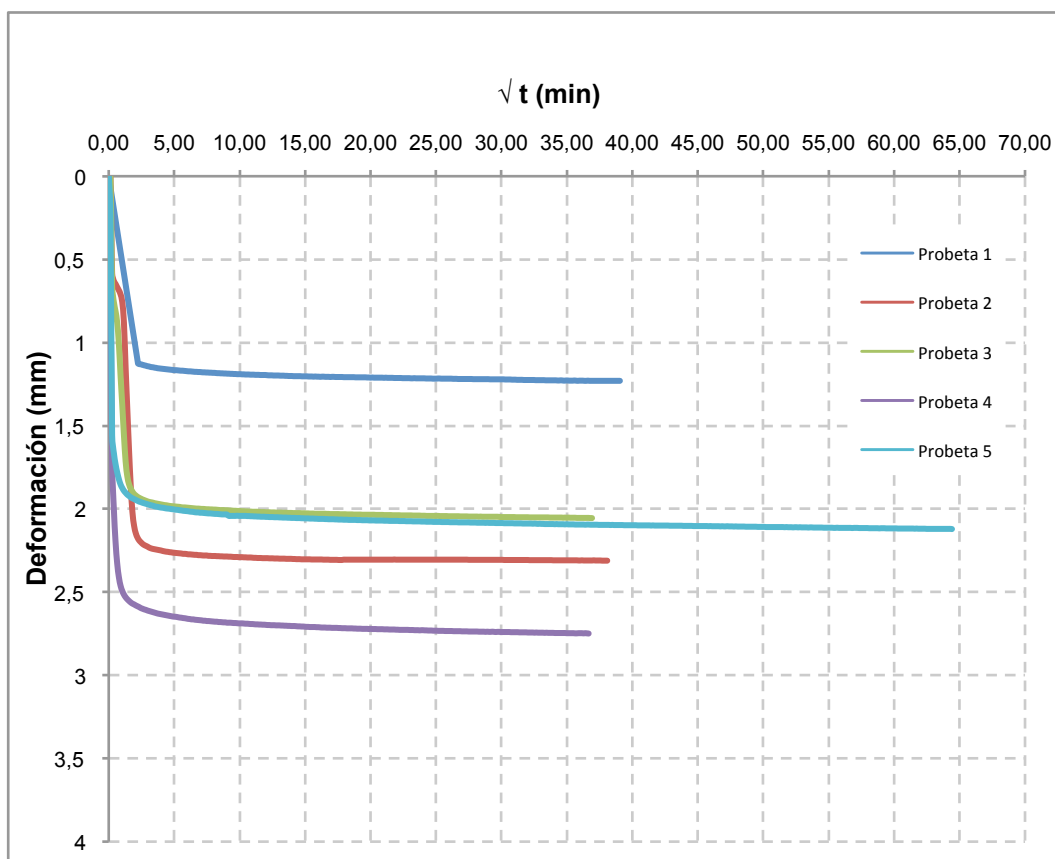


Figura 7.3.20. Curvas de consolidación. DIT14-201.

Fase de rotura

Transcurridas al menos 24 horas desde el inicio de la fase de consolidación, se aplicó a las probetas un esfuerzo horizontal paralelo al plano de rotura con el objetivo de inducir en el suelo una tensión tangencial. Este esfuerzo fue aplicado de forma continua a una velocidad aproximada de 1 mm/min, registrándose en todo momento las deformaciones horizontales correspondientes hasta el momento de la rotura.

La Figura 7.3.21 describe la evolución de la tensión tangencial a medida que se va produciendo el desplazamiento horizontal. Hay que tener en cuenta que durante la fase de rotura el área que sirve como cálculo para la tensión tangencial va disminuyendo a medida que la parte superior de la probeta se desplaza sobre la inferior y por tanto, la tensión tangencial se calcula como:

$$\tau = F/hAc$$

siendo F_h el esfuerzo horizontal aplicado sobre la probeta y A_c el área corregida, definida como la superficie de contacto entre la parte superior e inferior de la probeta.

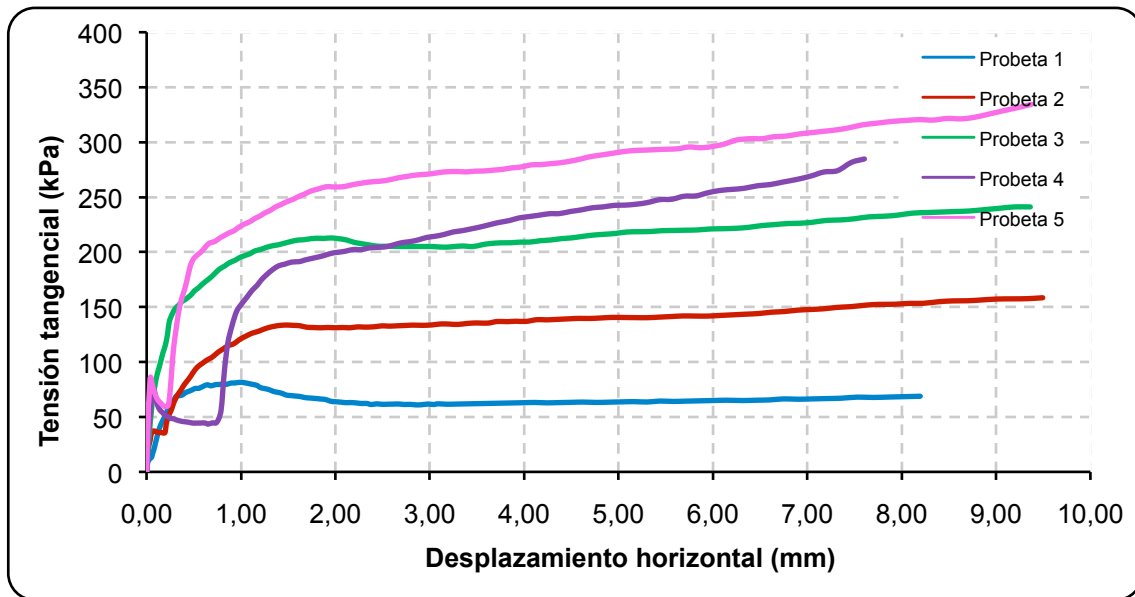


Figura 7.3.21. Evolución de la tensión tangencial con el desplazamiento horizontal. DIT14-201.

Se observa en la gráfica anterior que las probetas 4 y 5, las correspondientes a los mayores escalones de carga, sufren un colapso al inicio de la fase de rotura.

Por su parte, en la Figura 7.3.22 se muestra la evolución de los desplazamientos verticales con los desplazamientos horizontales durante la fase de rotura.

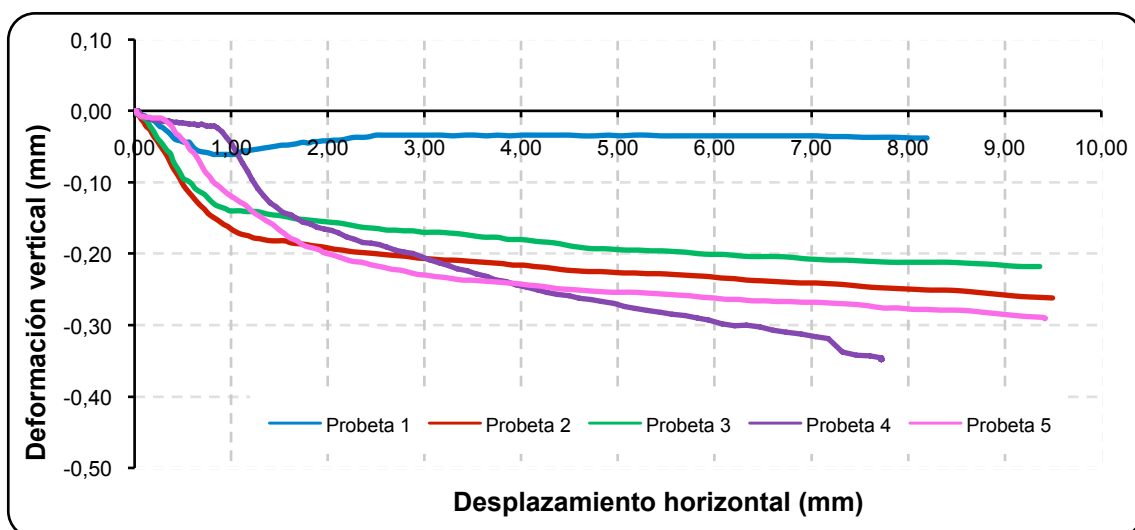


Figura 7.3.22. Evolución de los desplazamientos verticales con los desplazamientos horizontales. DIT14-201.

Estimación de los parámetros resistentes del terreno

Para el cálculo de la cohesión efectiva y el ángulo de rozamiento efectivo se toman dos criterios:

- Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial. En la Figura 7.3.21 se observa como la tensión tangencial de las probetas 1, 2 y 3 alcanza un valor de pico y después disminuye a medida que aumenta el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor estable, valor residual.
- Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones. En la Figura 7.3.21 se observa como la tensión tangencial en las probetas 4 y 5 alcanza un valor en el que se mantiene constante, aproximadamente, asintótico al valor residual mientras sigue aumentando la deformación horizontal que sufre la probeta.

Siguiendo estos criterios obtenemos un punto por cada escalón de carga (Tabla 7.3.7 y Tabla 7.3.8) para representar la gráfica tensión normal – tensión tangencial de la que obtenemos los parámetros resistentes del terreno, siendo el ángulo de rozamiento efectivo la pendiente de la recta y la cohesión del suelo su ordenada en el origen.

PROBETA		1	2	3	4	5	
Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial	Tensión normal corregida	kPa	112	221	329	499	620
	Tensión tangencial corregida	kPa	82	134	213	269	309
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.06	-0.18	-0.15	-0.32	-0.27
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	1.00	1.49	1.81	7.04	7.05

Tabla 7.3.7. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial con el Criterio de rotura nº 1. DIT14-201.

PROBETA		1	2	3	4	5	
Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones	Tensión normal corregida	kPa	133	259	383	499	620
	Tensión tangencial corregida	kPa	66	148	227	269	309
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.04	-0.24	-0.21	-0.32	-0.27
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	7.05	7.05	7.06	7.04	7.05

Tabla 7.3.8. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial con el Criterio de rotura nº 2. DIT14-201.

De esta forma obtenemos las rectas tensión normal – tensión tangencial máxima correspondientes a cada uno de los dos criterios anteriores (Figura 7.3.23).

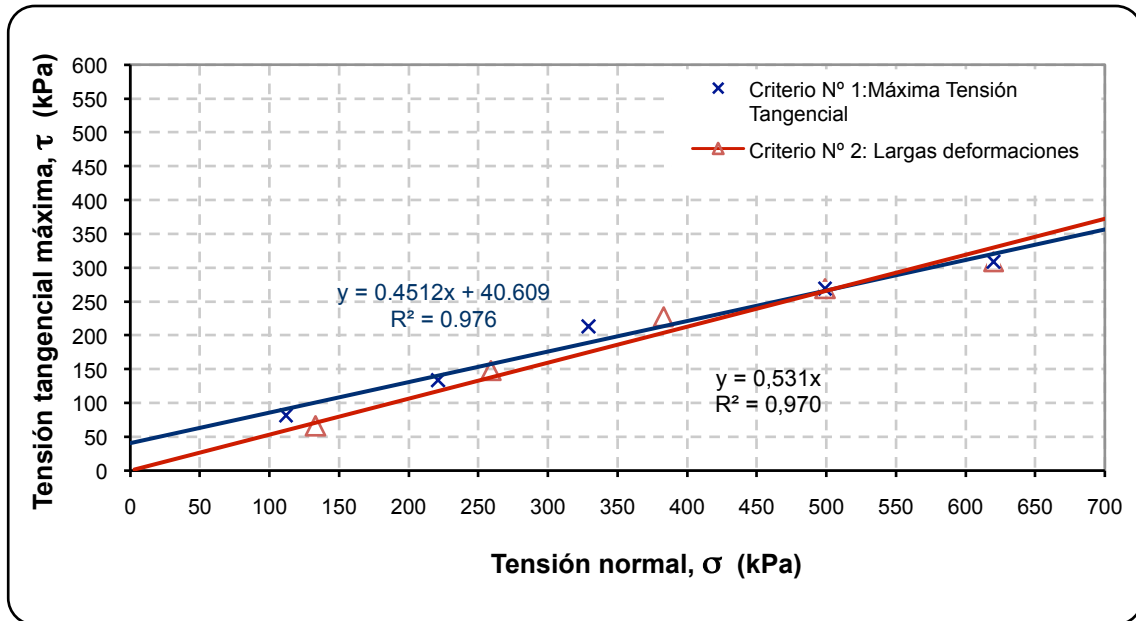


Figura 7.3.23. Gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima. DIT14-201.

	Criterio de rotura	
	Criterio nº 1: Máxima Tensión Tangencial	Criterio nº 2: Largas deformaciones
Cohesión efectiva c' (kPa)	40.6	0
Ángulo de rozamiento efectivo ϕ' (°)	24	28

Tabla 7.3.9. Parámetros resistentes del suelo. DIT14-201.

7.3.2.3 DIT14- 601: Montaberner

Generalidades

Al igual que para las muestras de Alcoy se realizaron ensayos de corte directo, pero esta vez con de 3 escalones de carga y con las siguientes características:

- Muestra remodelada con la humedad óptima y compactada a la energía correspondiente al ensayo del Proctor Modificado.
- Con deformación controlada.
- Con drenaje.
- Con consolidación previa.
- Con velocidad de corte baja.

Fase de saturación

Se introdujo la caja de corte dentro de la bancada y se llenó de agua para saturar la muestra durante 24 horas. Durante este tiempo, se observó la deformación vertical que se iba produciendo en la muestra debido al hinchamiento de la misma y se añadieron pesas ligeras para contrarrestar esta deformación. El peso total añadido es la presión de hinchamiento de la

muestra. La Tabla 7.3.10 muestra la presión de hinchamiento de la muestra en cada escalón de carga.

Probeta	Escalón de carga (kPa)	Presión de hinchamiento (kPa)	Tensión normal total (kPa)
1	100	5	105
2	200	4	204
3	300	3	303

Tabla 7.3.10. Escalones de carga y presión de hinchamiento de las muestras seleccionadas. DIT14-601.

Fase de consolidación

Transcurridas al menos 24 horas desde el inicio de la fase de saturación, se añadió el peso vertical correspondiente a cada escalón de carga para iniciar el proceso de consolidación y se mantuvo durante al menos 24 horas registrando las deformaciones verticales que se iban produciendo. La Figura 7.3.24 muestra las curvas de consolidación de todos los escalones de carga.

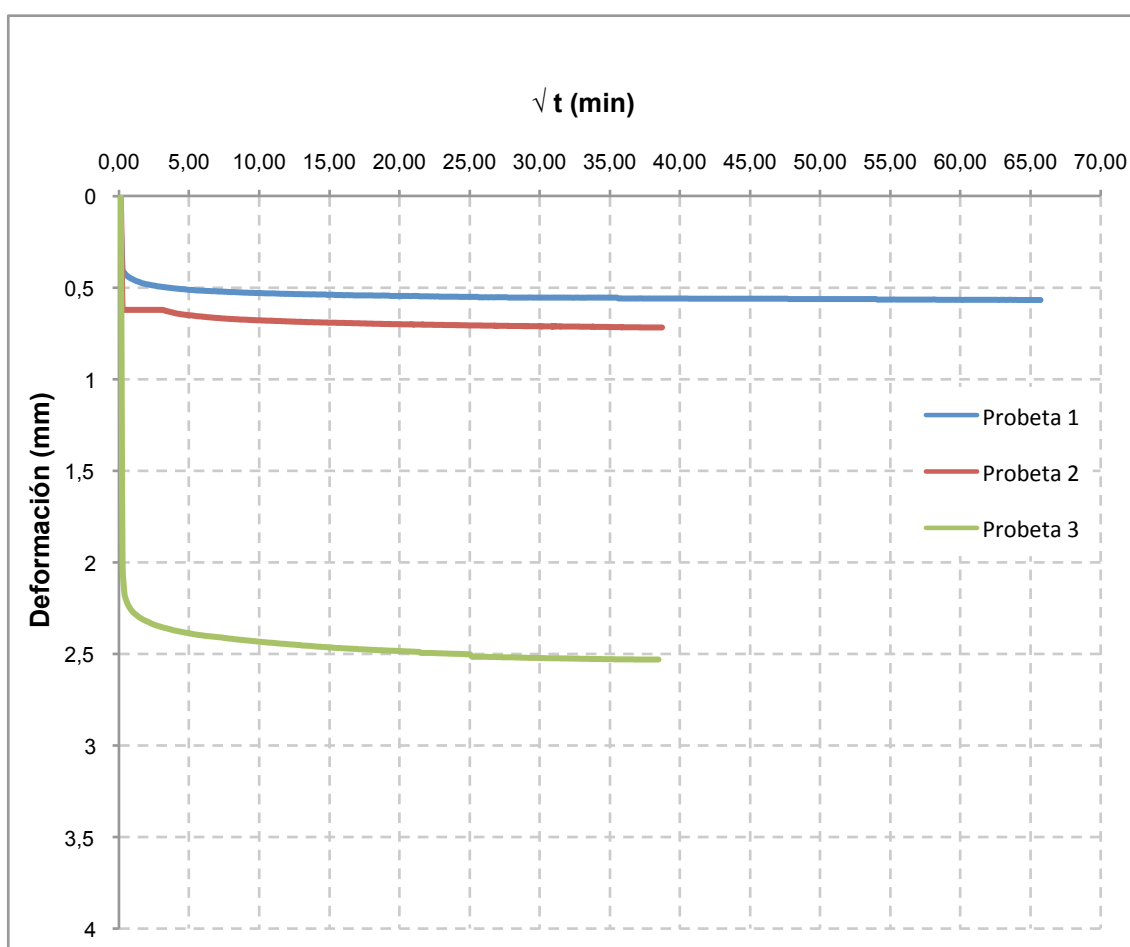


Figura 7.3.24. Curvas de consolidación de las muestras. DIT14-601.

Fase de rotura

Transcurridas al menos 24 horas desde el inicio de la fase de consolidación, se aplicó a las probetas un esfuerzo horizontal paralelo al plano de rotura con el objetivo de inducir en el suelo una tensión tangencial. Este esfuerzo fue aplicado de forma continua a una velocidad aproximada de 1 mm/min, registrándose en todo momento las deformaciones horizontales correspondientes hasta el momento de la rotura.

La Figura 7.3.25 describe la evolución de la tensión tangencial a medida que se va produciendo el desplazamiento horizontal. Hay que tener en cuenta que durante la fase de rotura el área que sirve como cálculo para la tensión tangencial va disminuyendo a medida que la parte superior de la probeta se desplaza sobre la inferior y por tanto, la tensión tangencial se calcula como:

$$\tau = F_h / A_c$$

siendo F_h el esfuerzo horizontal aplicado sobre la probeta y A_c el área corregida, definida como la superficie de contacto entre la parte superior e inferior de la probeta.

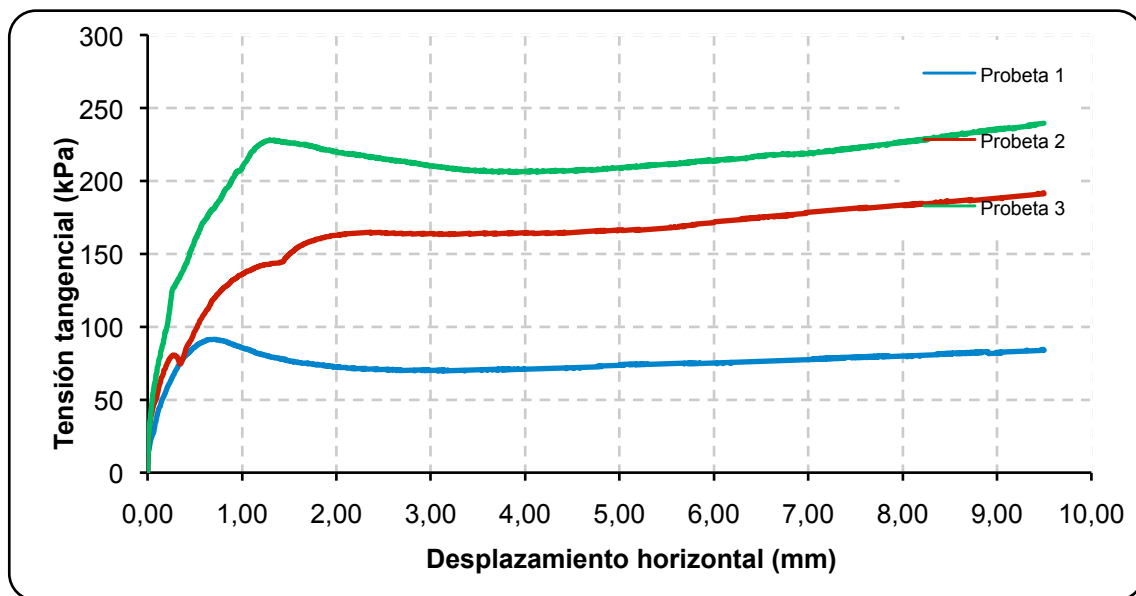


Figura 7.3.25. Evolución de la tensión tangencial con el desplazamiento horizontal. DIT14-601.

La Figura 7.3.26 muestra la evolución de los desplazamientos verticales con los desplazamientos horizontales durante la fase de rotura.

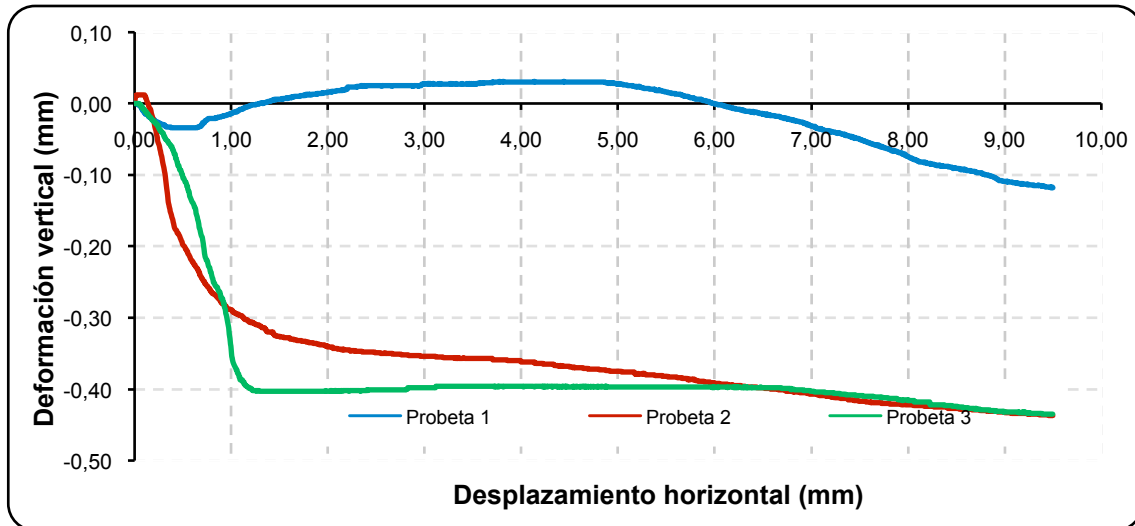


Figura 7.3.26. Evolución de las deformaciones verticales con las deformaciones horizontales. DIT14-601.

Estimación de los parámetros resistentes del terreno

Para el cálculo de la cohesión efectiva y el ángulo de rozamiento efectivo se toman dos criterios:

- Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial. En la Figura 7.3.25 se observa como la tensión tangencial de las probetas 1, 2 y 3 alcanza un valor de pico y después disminuye a medida que aumenta el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor estable, valor residual.
- Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones. Arbitrariamente establecemos 7.0 mm de deformación horizontal para obtener los puntos de la gráfica tensión normal – tensión tangencial máxima.

Siguiendo estos criterios obtenemos un punto por cada escalón de carga (Tabla 7.3.11 y Tabla 7.3.12) para representar la gráfica tensión normal – tensión tangencial de la que obtenemos los parámetros resistentes del terreno, siendo el ángulo de rozamiento efectivo la pendiente de la recta y la cohesión del suelo su ordenada en el origen.

PROBETA		1	2	3	
Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial	Tensión normal corregida	kPa	107	217	313
	Tensión tangencial corregida	kPa	91	165	228
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.03	-0.35	-0.40
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	0.73	2.35	1.29

Tabla 7.3.11. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima según el Criterio nº 1. DIT14-601.

PROBETA		1	2	3	
Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones	Tensión normal corregida	kPa	128	248	368
	Tensión tangencial corregida	kPa	77	178	227
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.03	-0.41	-0.40
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	7.00	7.00	7.00

Tabla 7.3.12. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima según el Criterio nº 2. DIT14-601.

De esta forma obtenemos las rectas tensión normal – tensión tangencial máxima correspondientes a cada uno de los dos criterios anteriores (Figura 7.3.27).

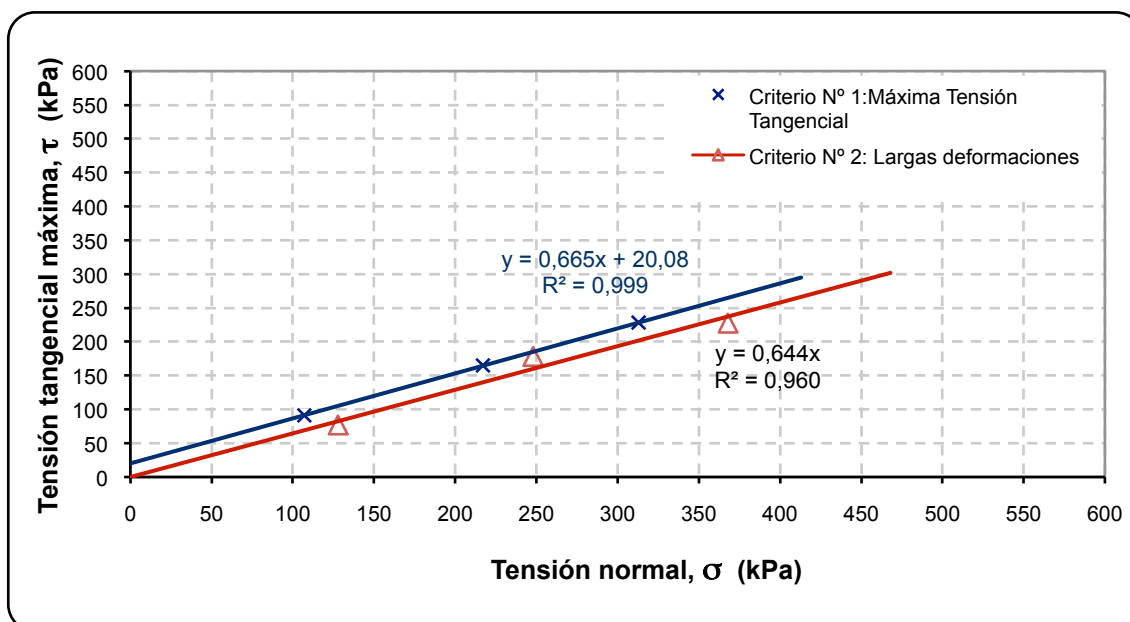


Figura 7.3.27. Gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima. DIT14-601.

	Criterio de rotura	
	Criterio nº 1: Máxima Tensión Tangencial	Criterio nº 2: Largas deformaciones
Cohesión efectiva c' (kPa)	20.1	0.0
Ángulo de rozamiento efectivo ϕ' (°)	33.6	32.8

Tabla 7.3.13. Parámetros resistentes del suelo. DIT14-601.

7.3.2.4 DIT14- 1001: Benisa

Generalidades

Como en el caso anterior se realizó ensayos de corte directo de 3 escalones de carga, con las siguientes características:

- Muestra remodelada con la humedad óptima y compactada a la energía correspondiente al ensayo del Proctor Modificado.
- Con deformación controlada.
- Con drenaje.
- Con consolidación previa.
- Con velocidad de corte media.
- Con la realización de varias pasadas para obtener los parámetros resistentes efectivos residuales.

Fase de saturación

Se introdujo la caja de corte dentro de la bancada y se llenó de agua para saturar la muestra durante 24 horas. La Tabla 7.3.14 muestra los escalones de carga.

Probeta	Escalón de carga (kPa)
1	100
2	200
3	300

Tabla 7.3.14. Escalones de carga.

Fase de consolidación

Transcurridas al menos 24 horas desde el inicio de la fase de saturación, se añadió el peso vertical correspondiente a cada escalón de carga para iniciar el proceso de consolidación y se mantuvo durante al menos 24 horas registrando las deformaciones verticales que se iban produciendo. La Figura 7.3.28 muestra las curvas de consolidación de todos los escalones de carga:

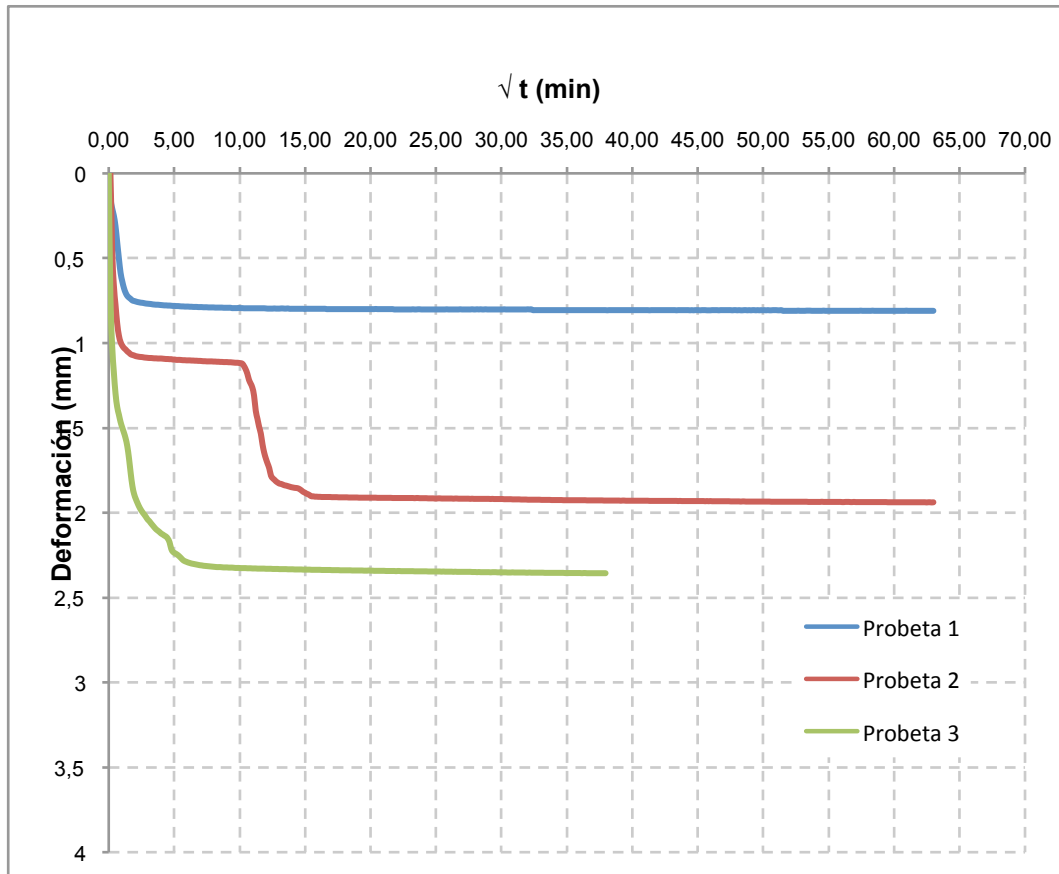


Figura 7.3.28. Curvas de consolidación de las muestras. DIT14-1001.

Fase de rotura

Transcurridas al menos 24 horas desde el inicio de la fase de consolidación, se aplicó a la probeta un esfuerzo horizontal paralelo al plano de rotura con el objetivo de inducir en el suelo una tensión tangencial. Este esfuerzo fue aplicado de forma continua a una velocidad aproximada de 3 mm/min, registrándose en todo momento las deformaciones horizontales correspondientes hasta el momento de la rotura.

La Figura 7.3.29 describe la evolución de la tensión tangencial a medida que se va produciendo el desplazamiento horizontal. Hay que tener en cuenta que durante la fase de rotura el área que sirve como cálculo para la tensión tangencial va disminuyendo a medida que la parte superior de la probeta se desplaza sobre la inferior y por tanto, la tensión tangencial se calcula como:

$$\tau = F_h / A_c$$

siendo F_h el esfuerzo horizontal aplicado sobre la probeta y A_c el área corregida, definida como la superficie de contacto entre la parte superior e inferior de la probeta.

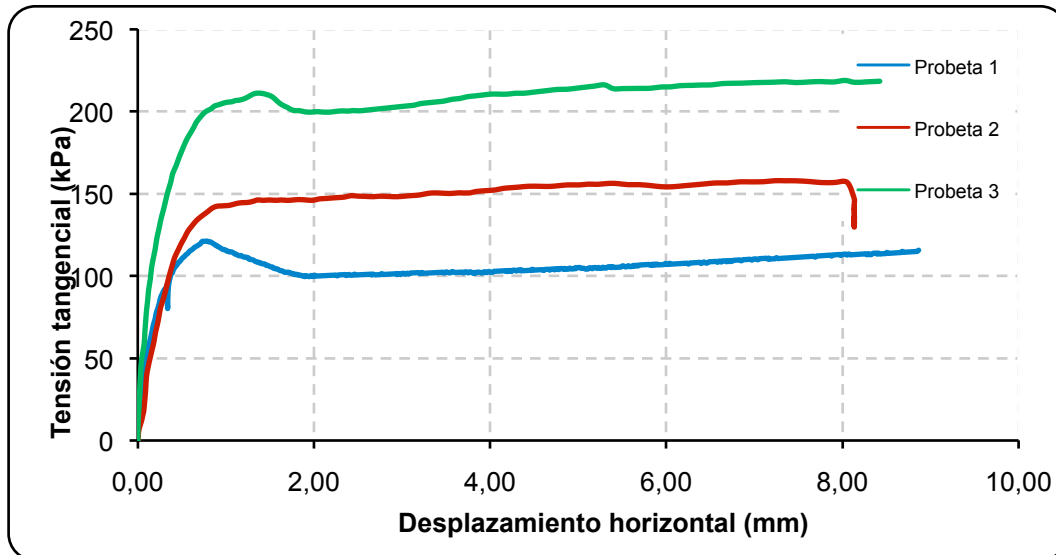


Figura 7.3.29. Evolución de la tensión tangencial con el desplazamiento horizontal. DIT14-1001.

La Figura 7.3.30 muestra la evolución de los desplazamientos verticales con los desplazamientos horizontales durante la fase de rotura.

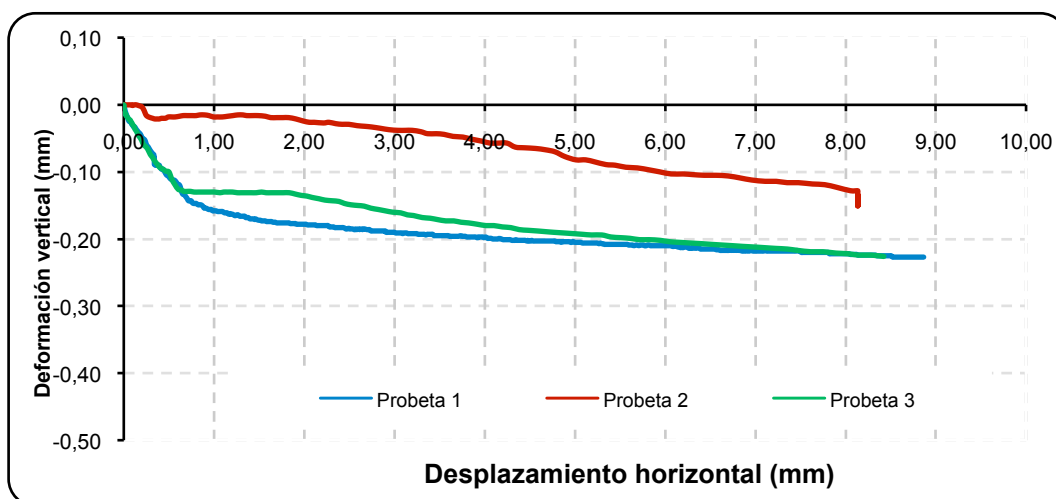


Figura 7.3.30. Evolución de las deformaciones verticales con las deformaciones horizontales. DIT14-1001.

Estimación de los parámetros resistentes del terreno

Para el cálculo de la cohesión efectiva y el ángulo de rozamiento efectivo se toman dos criterios:

- Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial. En la Figura 7.3.29 se observa como la tensión tangencial de las probetas 1, 2 y 3 alcanza un valor de pico y después disminuye a medida que aumenta el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor estable, valor residual.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

- Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones. Arbitrariamente establecemos 7.0 mm de deformación horizontal para obtener los puntos de la gráfica tensión normal – tensión tangencial máxima.

Siguiendo estos criterios obtenemos un punto por cada escalón de carga (Tablas 7.3.15 y 7.3.16) para representar la gráfica tensión normal – tensión tangencial de la que obtenemos los parámetros resistentes del terreno, siendo el ángulo de rozamiento efectivo la pendiente de la recta y la cohesión del suelo su ordenada en el origen.

PROBETA		1	2	3	
Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial	Tensión normal corregida	kPa	102	207	311
	Tensión tangencial corregida	kPa	121	146	211
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.15	-0.02	-0.13
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	0.79	1.36	1.35

Tabla 7.3.15. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima según el Criterio nº 1. DIT14-1001.

PROBETA		1	2	3	
Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones	Tensión normal corregida	kPa	122	243	365
	Tensión tangencial corregida	kPa	110	157	217
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.22	-0.11	-0.21
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	7.00	6.96	7.00

Tabla 7.3.16. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima según el Criterio nº 2. DIT14-1001.

De esta forma obtenemos las rectas tensión normal – tensión tangencial máxima correspondientes a cada uno de los dos criterios anteriores (Figura 7.3.31).

	Criterio de rotura	
	Criterio nº 1: Máxima Tensión Tangencial	Criterio nº 2: Largas deformaciones
Cohesión efectiva c' (kPa)	70.6	54.2
Ángulo de rozamiento efectivo ϕ' (°)	23.2	23.8

Tabla 7.3.17. Parámetros resistentes del suelo. DIT14-1001.

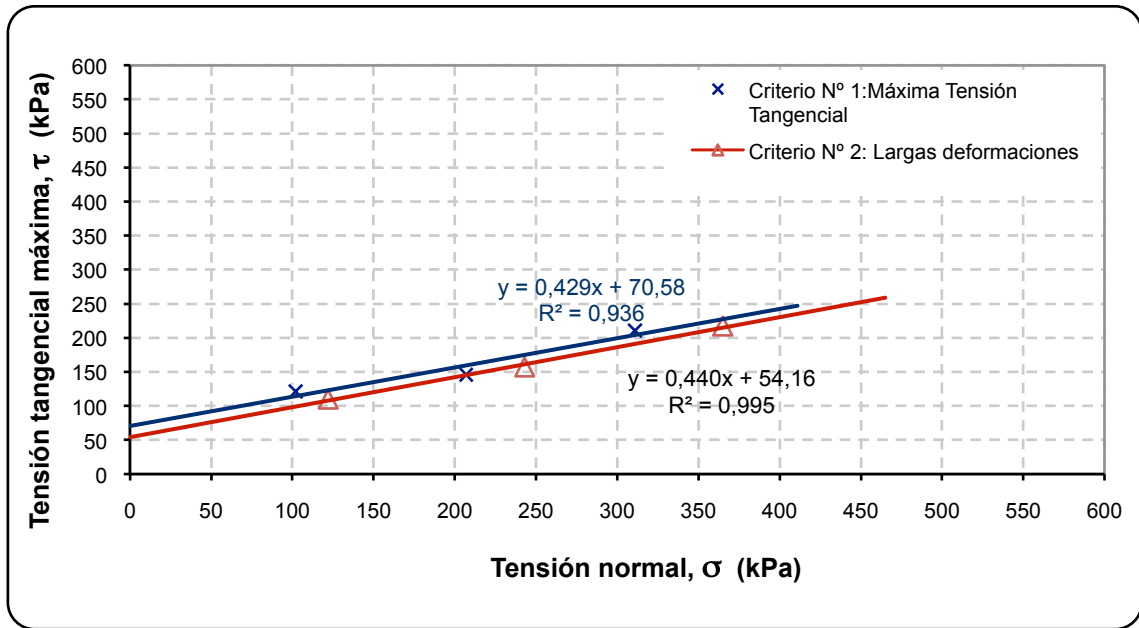


Figura 7.3.31. Gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima. DIT14-1001.

Con el fin de obtener los parámetros resistentes efectivos residuales, se le aplicaron varios ciclos de la fase de rotura (entre 7 y 10) a las probetas, para cada escalón de carga, hasta que se observó que la resistencia cortante máxima alcanzada era similar entre un ciclo y el anterior.

La Figura 7.3.32 describe la evolución de la tensión tangencial a medida que se va produciendo el desplazamiento horizontal durante el último ciclo de rotura aplicado en cada escalón de carga.

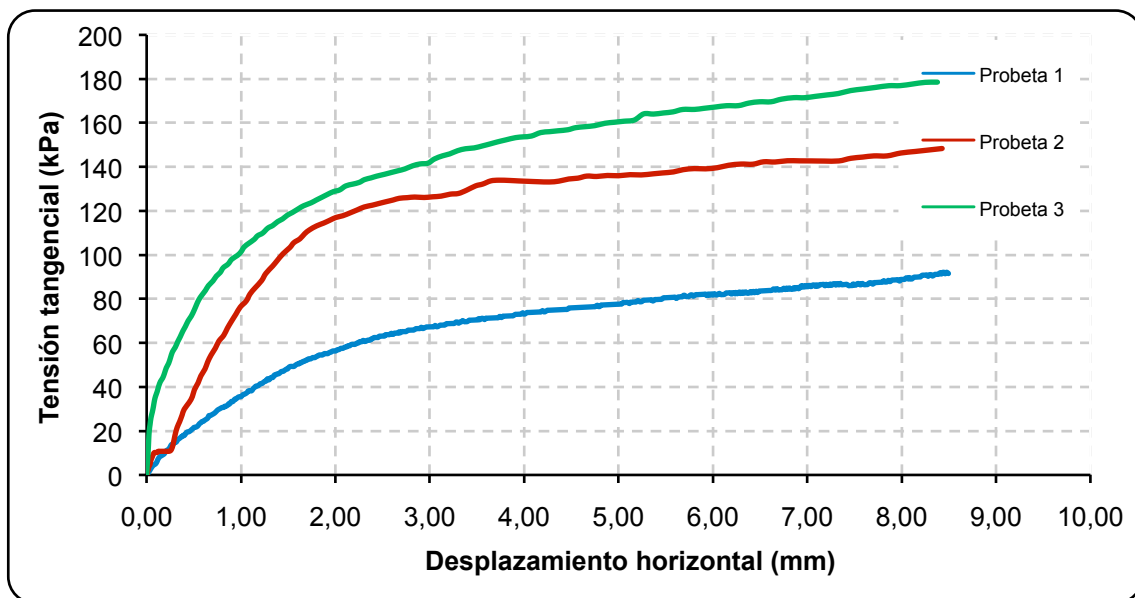


Figura 7.3.32. Evolución de la tensión tangencial con el desplazamiento horizontal durante el último ciclo de rotura aplicado en cada escalón de carga. DIT14-1001.

Se observa en la Figura 7.3.32 que en este caso no se observa en la gráfica una resistencia de pico.

La Figura 7.3.33 muestra la evolución de los desplazamientos verticales con los desplazamientos horizontales durante el último ciclo de rotura aplicado en cada escalón de carga.

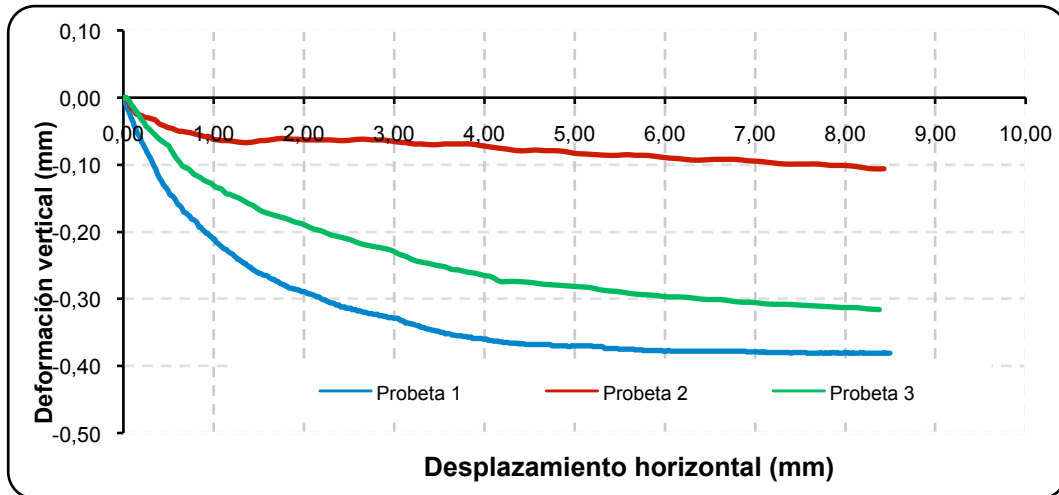


Figura 7.3.33. Evolución de las deformaciones verticales con las deformaciones horizontales durante el último ciclo de rotura. DIT14-1001.

Para el cálculo de la cohesión efectiva residual y el ángulo de rozamiento efectivo residual se toman dos criterios:

- Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial. En la Figura 7.3.32 se observa como la tensión tangencial de las probetas no alcanza un valor de pico, tal como sucedía en las anteriores gráficas, de modo que tomaremos la tensión tangencial como la máxima que se da en las gráficas y que corresponde en todos los casos al máximo desplazamiento horizontal.
- Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones. Arbitrariamente establecemos 7.0 mm de deformación horizontal para obtener los puntos de la gráfica tensión normal – tensión tangencial máxima.

Siguiendo estos criterios obtenemos un punto por cada escalón de carga (Tablas 7.3.18 y 7.3.19) para representar la gráfica tensión normal – tensión tangencial de la que obtenemos los parámetros resistentes del terreno, siendo el ángulo de rozamiento efectivo residual la pendiente de la recta y la cohesión residual del suelo su ordenada en el origen.

De esta forma obtenemos las rectas tensión normal – tensión tangencial máxima correspondientes a cada uno de los dos criterios anteriores (Figura 7.3.34).

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

PROBETA		1	2	3	
Criterio de rotura nº 1: Máxima tensión tangencial	Tensión normal corregida	kPa	127	254	381
	Tensión tangencial corregida	kPa	92	148	179
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.38	-0.11	-0.32
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	8.50	8.43	8.38

Tabla 7.3.18. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima según el Criterio nº 1. DIT14-1001.

PROBETA		1	2	3	
Criterio de rotura nº 2: Largas deformaciones	Tensión normal corregida	kPa	125	251	376
	Tensión tangencial corregida	kPa	89	146	177
	Deformación vertical en rotura	mm	-0.38	-0.10	-0.31
	Desplazamiento horizontal en rotura	mm	8.00	7.99	7.98

Tabla 7.3.19. Obtención de los puntos de la gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima según el Criterio nº 2. DIT14-1001.

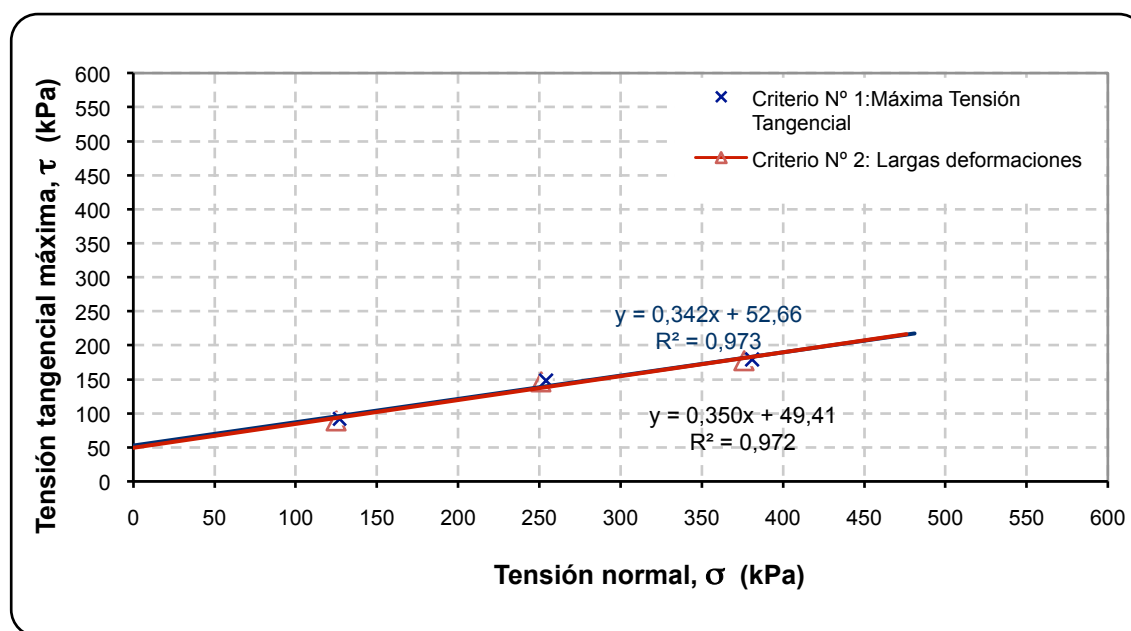


Figura 7.3.34. Gráfica tensión normal - tensión tangencial máxima para la determinación de los parámetros efectivos residuales. DIT14-1001.

	Criterio de rotura	
	Criterio nº 1: Máxima Tensión Tangencial	Criterio nº 2: Largas deformaciones
Cohesión efectiva residual c_r' (kPa)	52.7	49.4
Ángulo de rozamiento efectivo residual ϕ_r' (°)	18.9	19.3

Tabla 7.3.20. Parámetros resistentes efectivos residuales del suelo. DIT14-1001.

7.3.3 Ensayos triaxiales

Con las muestras DIT14-1001, procedente de Benisa, se prepararon 3 probetas con la fracción de suelo que pasa por el tamiz de abertura 2 mm, con una humedad aproximada a la óptima ($\approx 16\%$) y con la energía de compactación correspondiente al Proctor Modificado.

Con estas tres probetas se realizó un ensayo triaxial CU, es decir consolidado y sin drenaje, con el fin de obtener los parámetros resistentes efectivos: la cohesión efectiva (c') y el ángulo de rozamiento efectivo (ϕ').

Las gráficas que se obtienen del ensayo son las mostradas en las Figuras 7.3.35 a 7.3.39.

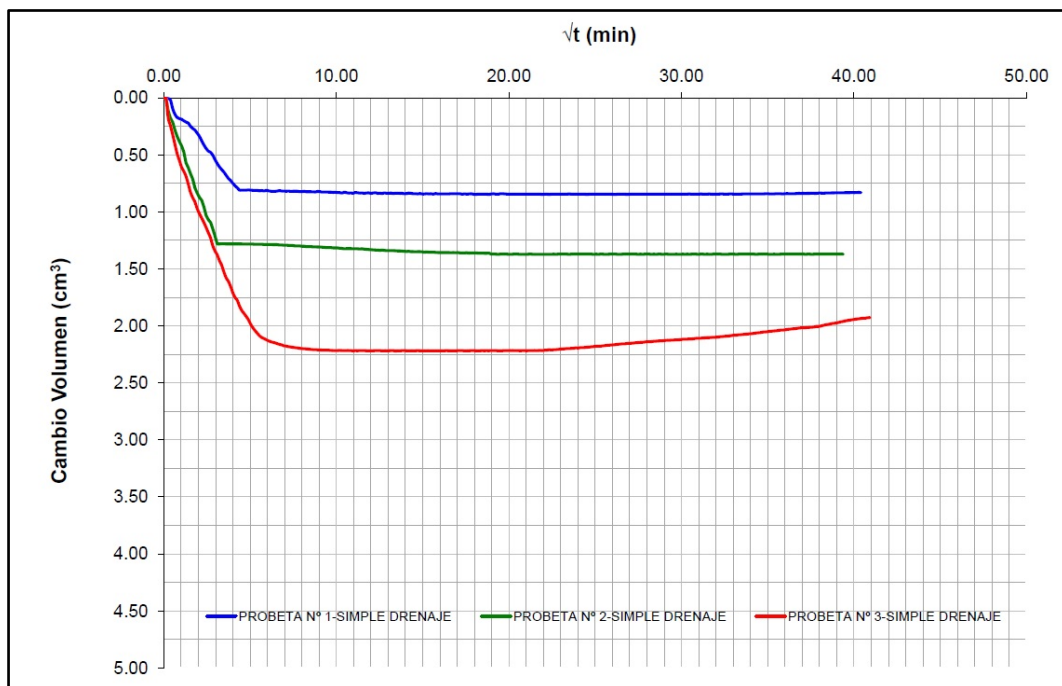


Figura 7.3.35. Curvas de consolidación del ensayo triaxial. DIT14-1001.

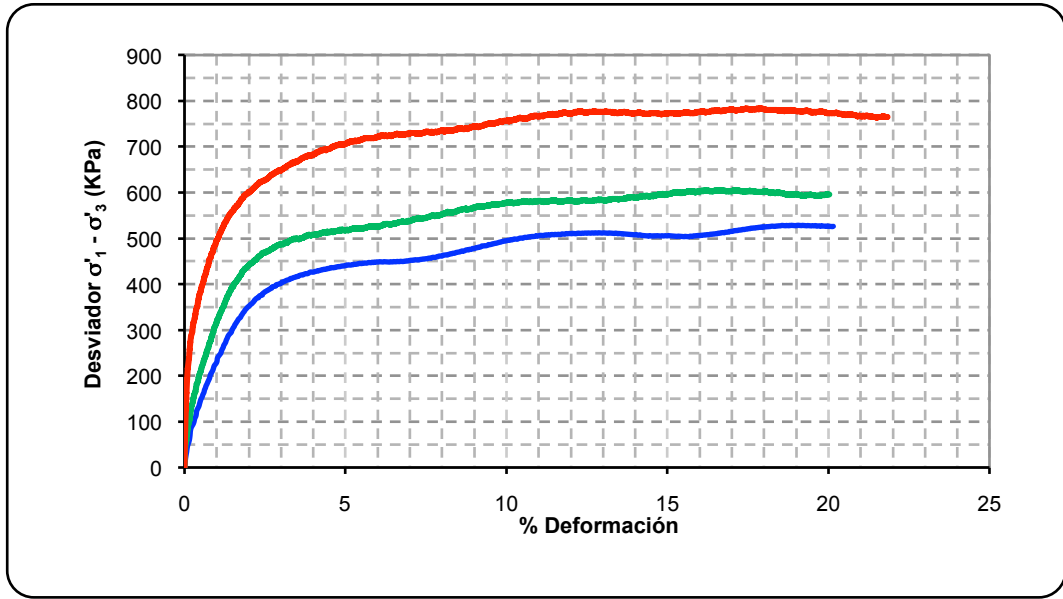


Figura 7.3.36. Tensión desviadora - % Deformación. DIT14-1001.

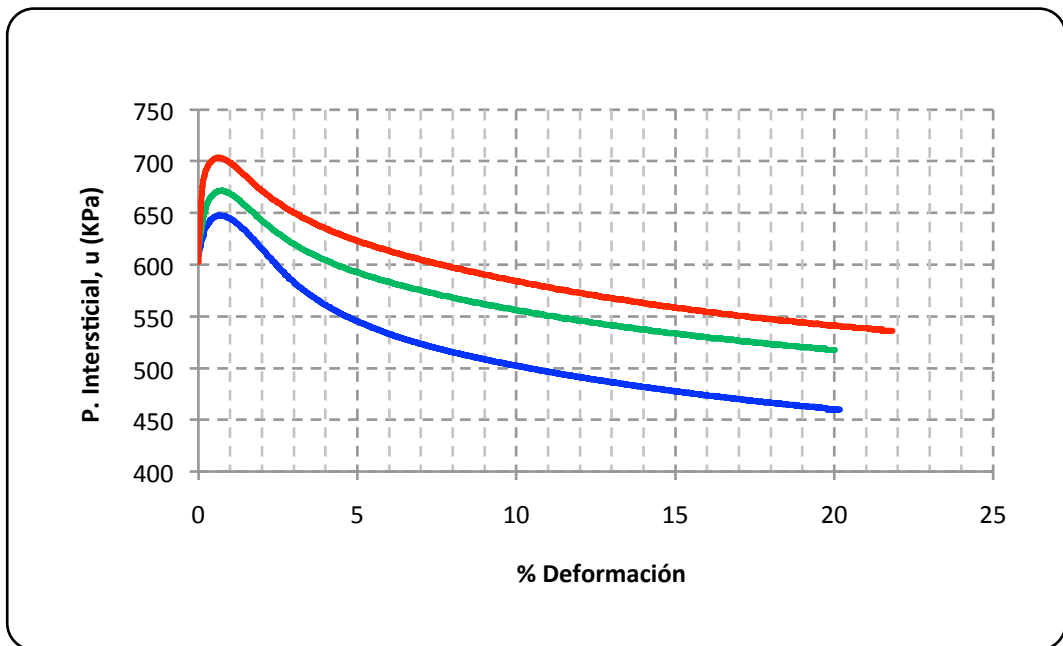


Figura 7.3.37. Presión intersticial - % Deformación. DIT14-1001.

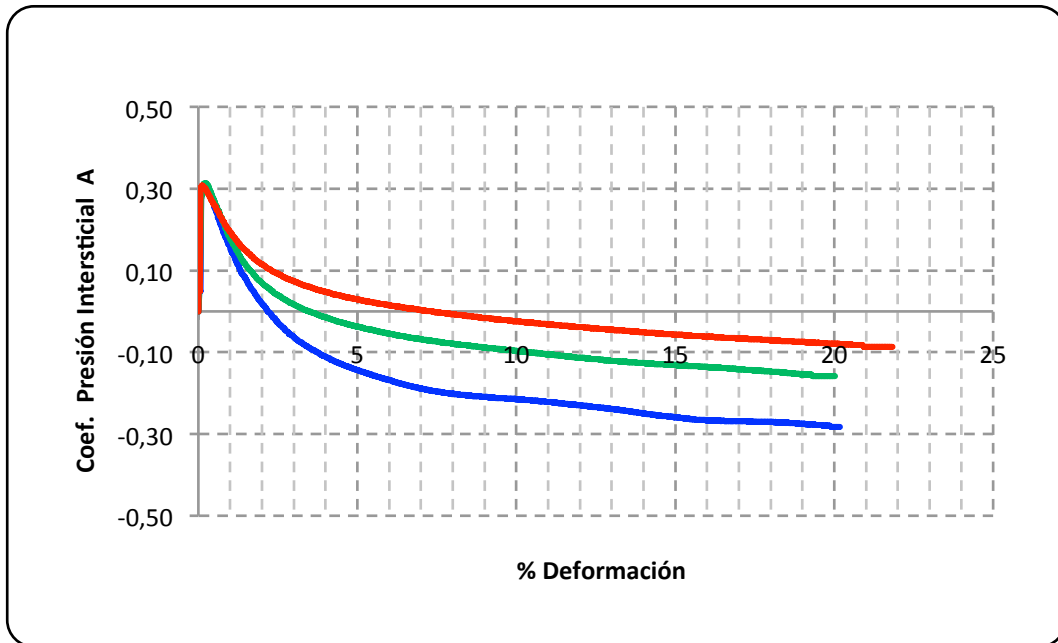


Figura 7.3.38. Coeficiente de presión intersticial - % Deformación. DIT 14-1001.

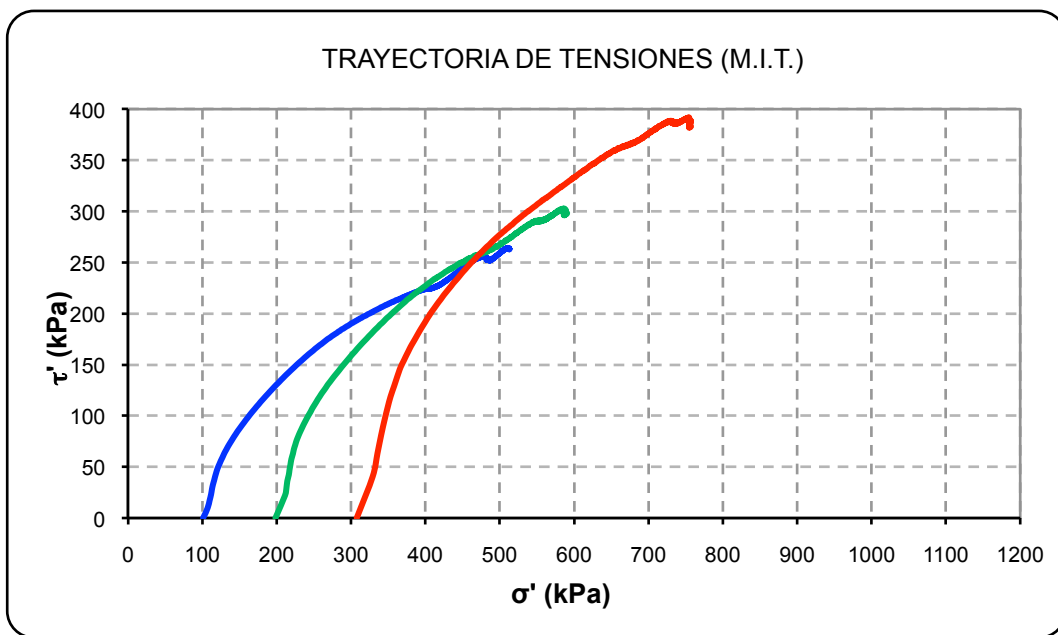


Figura 7.3.39. Trayectoria de tensiones (M.I.T.). DIT14-1001.

A continuación (Tabla 7.3.21) se presenta un cuadro resumen de los resultados obtenidos del ensayo en cada una de sus fases: saturación, consolidación y rotura.

			PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
FASE DE SATURACIÓN	PRESIÓN INTERS. INICIAL	Kpa	0	1	5
	PRESIÓN INTERS. FINAL		596	590	592
	PRESIÓN DE CÉLULA FINAL		610	610	610
	COEFICIENTE B	-	0.97	0.96	0.99
FASE DE CONSOLIDACIÓN	PRESIÓN DE CÉLULA	Kpa	710	810	910
	PRESIÓN DE COLA		600	600	600
	PRESIÓN INTERS. INICIAL		686	775	882
	PRESIÓN INTERS. FINAL		596	590	592
	$\Delta V_{\text{consolidación}} \text{ (cm}^3\text{)}$		0.85	1.31	2.22
FASE DE ROTURA	PRESIÓN DE CÉLULA	Kpa	710	810	910
	PRESIÓN INTERS. INICIAL		609	612	602
	P. CÉLULA EFECTIVA INICIAL		101	198	308
	VELOCIDAD DE ROTURA	mm/min	0.03	0.03	0.03
CONDICIONES DE ROTURA	DESVIADOR MÁXIMO	Kpa	526	595	773
	DEFORMACIÓN EN ROTURA	%	20	20	20
	PRESIÓN INTERS. ROTURA	Kpa	460	518	541
	$\sigma'_{3 \text{ MÁXIMO}}$	Kpa	250	292	369
	$\sigma'_{1 \text{ MÁXIMO}}$	Kpa	776	887	1142

Tabla 7.3.21. Cuadro resumen de los resultados del ensayo triaxial. DIT14-1001.

Con los datos obtenidos de la Tabla 7.3.21, se pueden obtener los círculos de Mohr correspondientes a cada una de las probetas ensayadas.

De la Figura 7.3.37 se obtienen los parámetros resistentes efectivos (c' y φ') con el criterio de rotura del 20 % de deformación.

Así pues los valores de los parámetros resistentes efectivos obtenidos del ensayo triaxial son los siguientes:

- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 31^\circ$

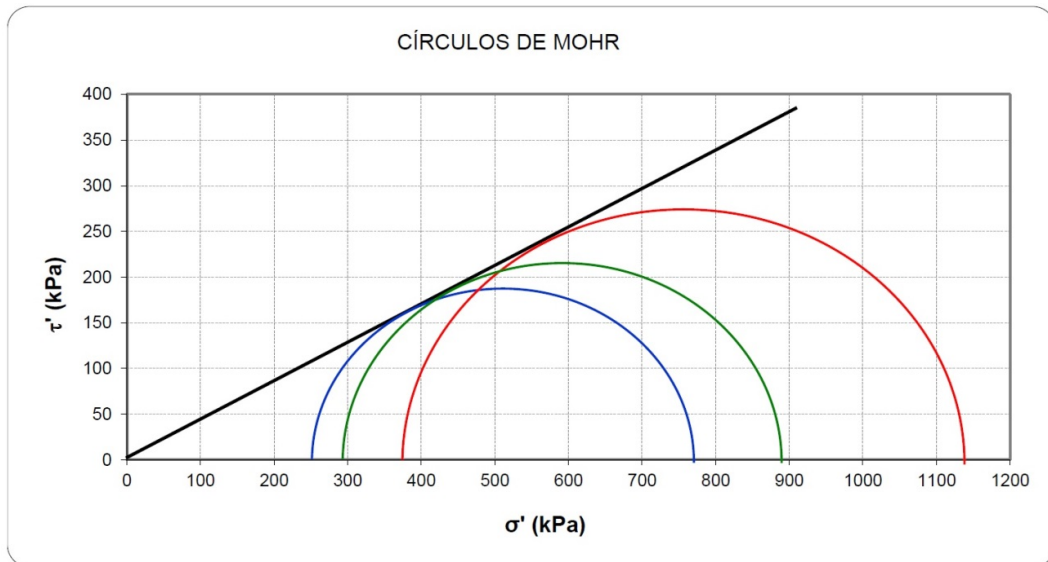


Figura 7.3.37. Círculos de Mohr de las probetas ensayadas. DIT14-1001.

Una vez finalizado el ensayo y con las probetas secas después de haber permanecido en estufa a una temperatura entre 105 y 110 °, es posible determinar mediante visualización y medición el ángulo de rozamiento efectivo que se corresponde con el ángulo del plano de rotura, tal como se observa en la Figura 7.3.38.



Figura 7.3.38. Probetas una vez finalizado el ensayo triaxial y determinación del ángulo del plano de rotura. DIT14-1001.

7.4. ENSAYOS DE DEFORMABILIDAD

7.4.1 Ensayos edométricos

Las muestras se prepararon por compactación directa en el anillo de confinamiento, con material #pasa 2 mm a la humedad óptima ($w_{opt} = 14.4 \%$), compactado en 3 capas a razón de 15 golpes por capa, con una maza de 0.5 kg según la energía especificada en el ensayo Proctor Normal. Es recomendable colocar papel filtro tanto en la cara superior como en la inferior de la probeta.

Un ejemplo de las gráficas y resultados obtenidos del ensayo son los que se muestran en las Figuras 7.4.1 a 7.4.3.

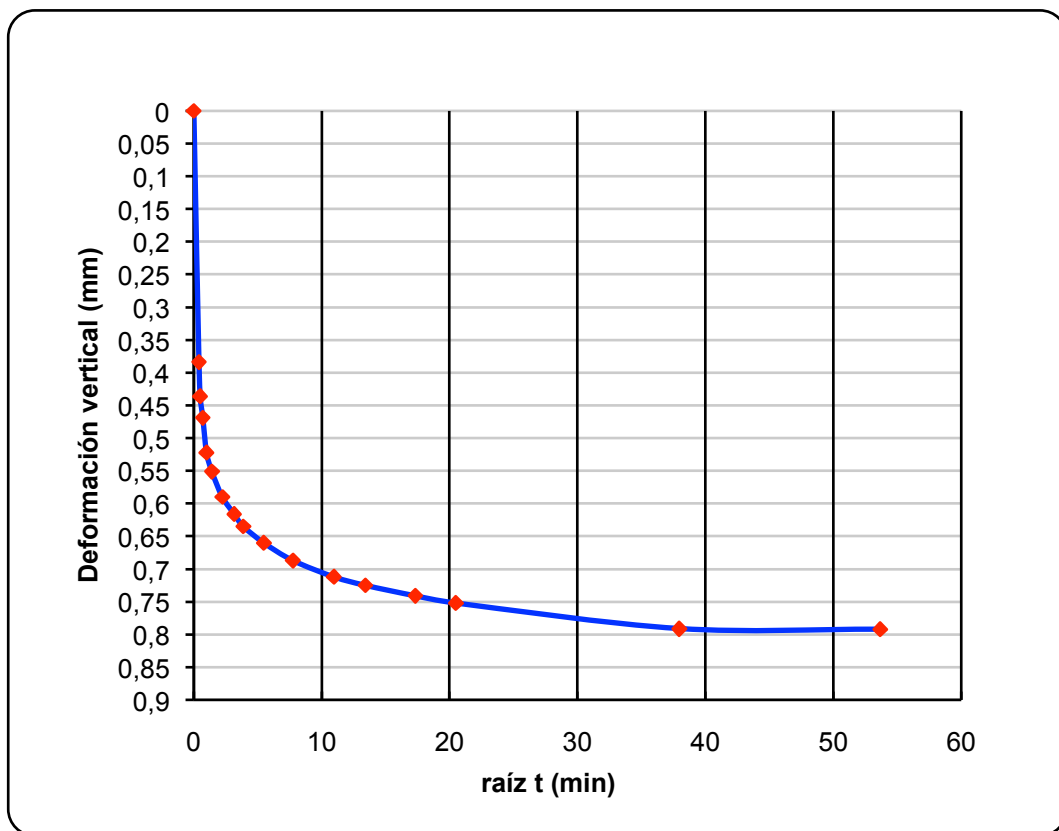


Figura 7.4.1. Curva de consolidación correspondiente al escalón de carga de 600 kPa obtenida con el Método de Taylor. DIT14-201.

Es posible calcular las pendientes de cada tramo de la curva edométrica (Figura 7.4.3), definidas como índice de compresión, C_c en la rama de compresión noval e índice de hinchamiento, C_s en la rama de descarga .

Con los datos obtenidos en el ensayo se obtienen estos parámetros de deformación y otros como el módulo edométrico, E_m (Tabla 7.4.1).

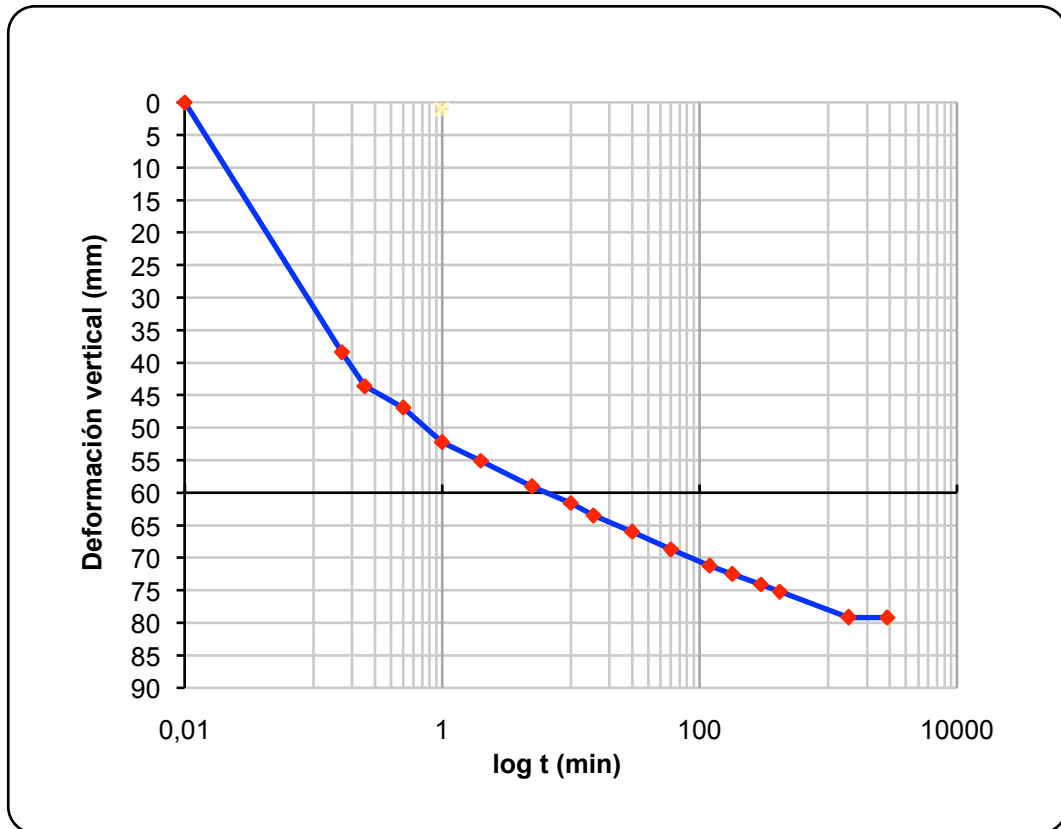


Figura 7.4.2. Curva de consolidación correspondiente al escalón de carga de 600 kPa obtenida con el Método de Casagrande. DIT14.201.

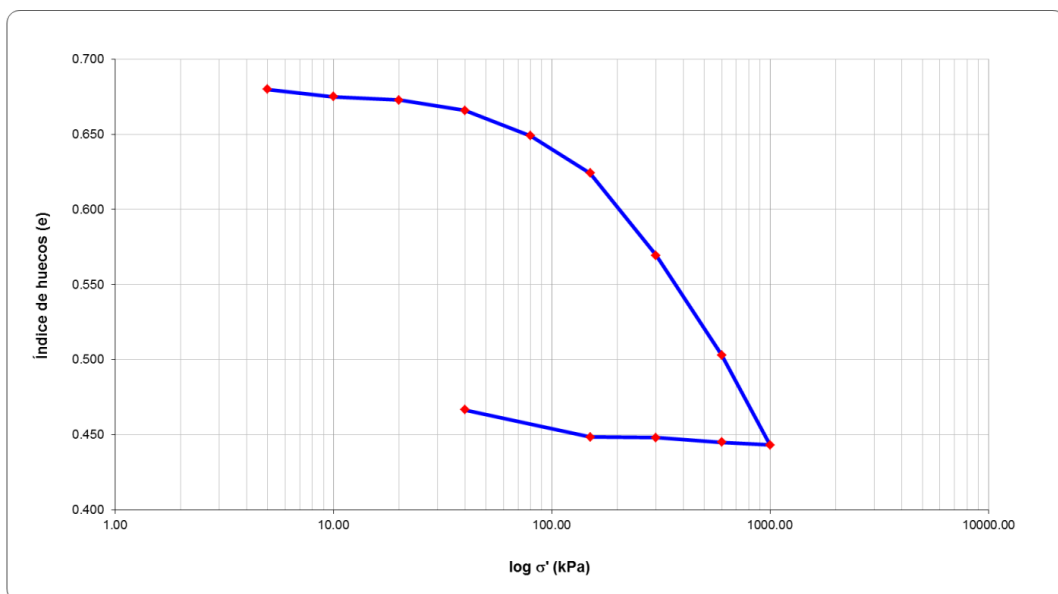


Figura 7.4.3. Curva edométrica del suelo. DIT14-201.

	C_c	C_s	E_m (kPa)
DIT14-201	0.182	0.006	4455

Tabla 7.4.1. Resultados obtenidos de la curva edométrica de laboratorio para una muestra del DIT14-201.

Hay que remarcar que al haber realizado el ensayo edométrico con una muestra remodelada, se producen varias diferencias con respecto a una muestra inalterada que hay que tener en cuenta (Morilla, 2012):

- El terreno es muy diferente del original y por tanto se comporta de otra forma, con una curva en la que no hay codo o punto de inflexión acusado.
- La pendiente de la rama final disminuye o sea su índice de compresión C_c disminuye.
- El índice de poros disminuye respecto al obtenido con la misma presión en una muestra inalterada, lo que significa que el suelo es más compresible.
- No se puede hablar de presión de consolidación.
- La parte final de las curvas de muestras inalteradas y remodeladas coincide bastante a la altura de $0.42e_0$.
- La rama de descarga suele ser bastante parecida en ambos casos.

Por último, comentar que la recta de regresión según Jiménez Salas y Justo Alpañes (1975) para suelos españoles consolidados naturalmente en función de w_l es:

$$C_c = 0.007 \cdot w_l - 10$$

La muestra anterior ensayada, correspondiente a la zona DIT14-201, tiene un valor del límite líquido del 36.0 %, por tanto:

$$C_c = 0.007 \cdot w_l - 10 = 0.007 \cdot (36.0 - 10) = 0.182$$

que coincide con el valor del índice de compresión obtenido con la curva edométrica.

7.4.2 Hinchamiento libre y presión de hinchamiento

Los valores medios de los ensayos de presión de hinchamiento (p_h) e hinchamiento libre (h_L) se muestran en la Tabla 7.4.2.

	p_h (kPa)	h_L (%)
DIT14-201	35	0.89
DIT14-601	--	0.81

Tabla 7.4.2. Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento e hinchamiento libre.

A continuación, en las Figuras 7.4.4 y 7.4.5 se muestran las gráficas que se han utilizado para la determinación del hinchamiento libre en una de las muestras a modo de ejemplo.

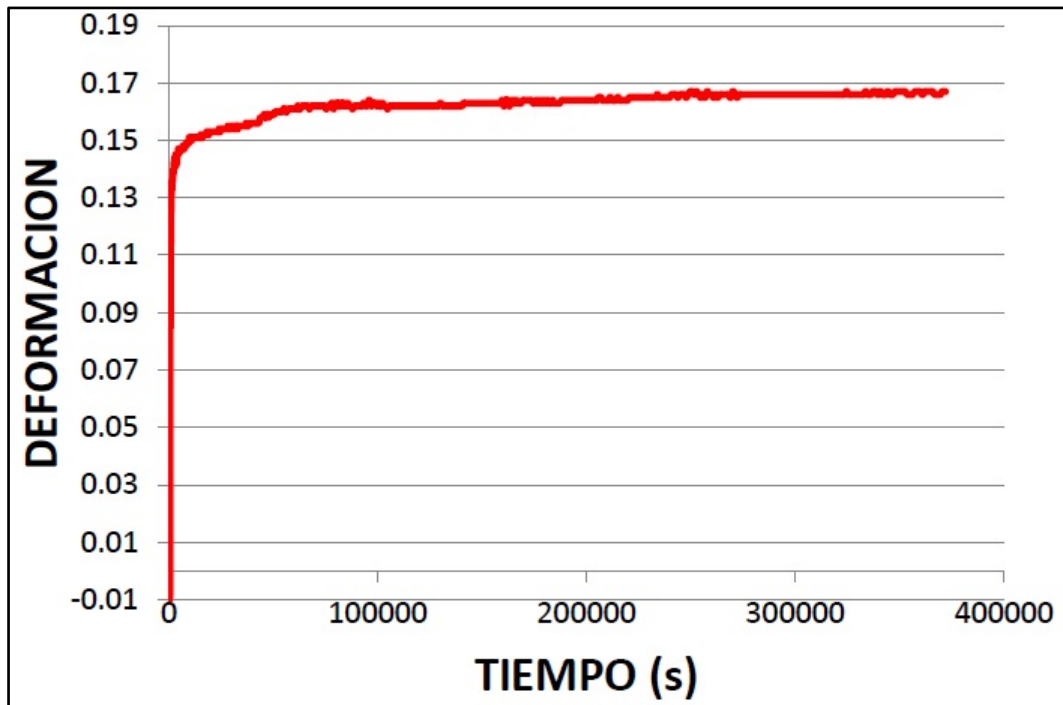


Figura 7.4.4. Deformación de la probeta (en mm) en función del tiempo de ensayo. DIT14-201.

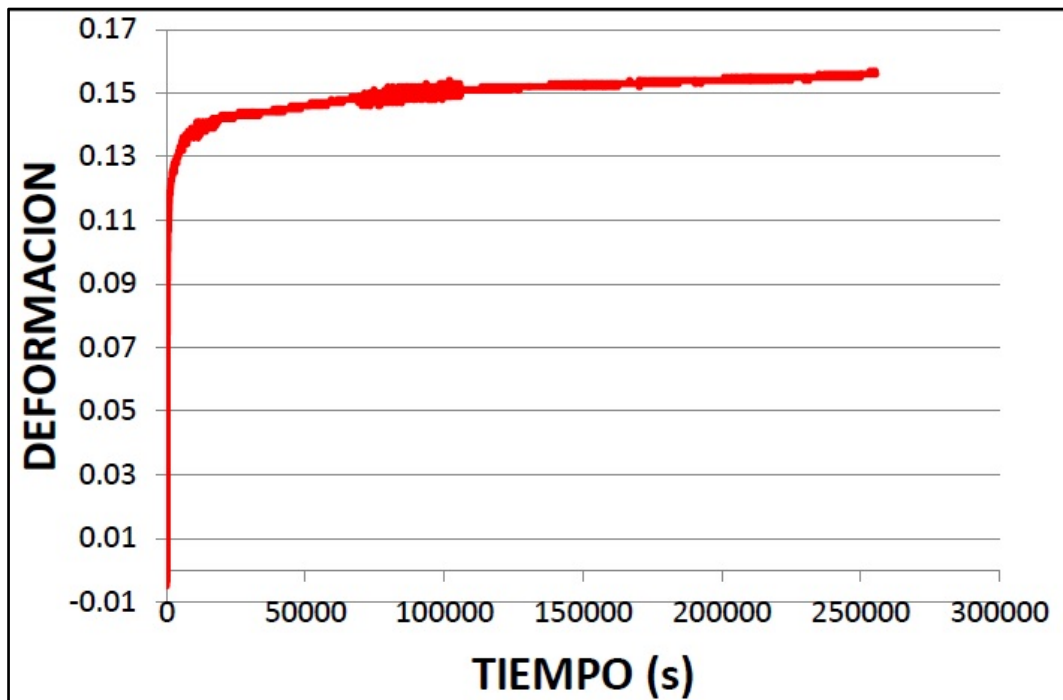


Figura 7.4.5. Deformación de la probeta (en mm) en función del tiempo de ensayo. DIT14-601.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

Se define el hinchamiento libre como el cociente entre el cambio de altura de la muestra y la altura total de la muestra, que en este ensayo es de 20 mm. Así pues, en la Figura 7.4.4:

$$hL = \Delta L L_o \cdot 100 = 0.167 - (-0.010) 20 \cdot 100 = 0.17720 \cdot 100 = 0.89 \%$$

De la misma forma, en la Figura 7.4.5:

$$hL = \Delta L L_o \cdot 100 = 0.156 - (-0.005) 20 \cdot 100 = 0.16120 \cdot 100 = 0.81 \%$$

Los cuadros de características de suelos españoles debidos a Jiménez Salas (1971) en Morilla (2012) recogen numerosos datos de hinchamiento libre y presión de hinchamiento en relación con la densidad, humedad y límites de Atterberg de cada suelo y en algunos casos los relacionan con el Índice de Lambe.

En la Tabla 7.4.3 se indican varios criterios de expansividad, que permiten una correlación entre los diversos valores obtenidos por métodos diferentes. Entre estos valores, uno muy utilizado es el Índice de Actividad de Skempton, A_c , que es el cociente entre el Índice de Plasticidad y el porcentaje de suelo inferior a 2 micras:

$$A_c = IP(\% \text{ suelo} < 0.002 \text{ mm})$$

Como puede verse en la Tabla 7.4.3 el riesgo de expansividad crece con el Límite Líquido y con el Índice de Plasticidad, y decrece con el Límite de Retracción, pero los parámetros más importantes para que exista expansividad son el porcentaje de finos que pasa por el tamiz de 0.080 mm y los porcentajes de 1 y 2 micras.

Expansividad	LR	IP	w _L	% # 200	% < 0.001 mm	Actividad IP/#2μ	Potencial de hinch. (Seed) %	Índice Lambe kg/cm ²	Presión de hinchamiento probable kg/cm ²	Hinch. probable en superficie (cm (McDowell))	% de hinch. probable
Baja	> 15	<18	<30	<30	<15	<0.5	0 – 1.5	< 0.8	< 0.3	1 – 3	1 – 5
Media	12 – 16	15 – 28	30 – 40	30 – 60	13 – 23	0.5 – 0.7	1.5 – 5.0	0.8 – 1.5	0.3 – 1.2	3 – 7	3 – 10
Alta	8 – 12	25 – 24	40 – 60	60 – 95	20 – 30	0.7 – 1.0	5 – 25	1.5 – 2.3	1.2 – 3.0	0 – 1	< 10
Muy alta	< 10	> 35	> 60	> 95	> 30	> 1.0	> 25	> 2.3	> 3	> 7	> 10

Tabla 7.4.3. Criterios de expansividad, tomado de Morilla (2012).

Según los criterios establecidos en la Tabla 7.4.3, las muestras ensayadas tienen una expansividad baja.

7.5. ENSAYOS DE ALTERABILIDAD

7.5.1 Slake Durability Test (SDT)

7.5.1.1. Generalidades

Se han realizado numerosos ensayos SDT, de los cuales vamos a mostrar doce (12) de ellos (4 de cada una de las zonas estudiadas), que consideramos representativos de las muestras ensayadas. Las características de estos doce ensayos se resumen en la Tabla 7.5.1.

Ensayo	Muestra	Humedad	Agua
1	DIT14-201	SI	Destilada
2	DIT14-201	SI	Zona
3	DIT14-201	NO	Destilada
4	DIT14-201	NO	Zona
5	DIT14-601	SI	Destilada
6	DIT14-601	SI	Zona
7	DIT14-601	NO	Destilada
8	DIT14-601	NO	Zona
9	DIT14-1001 Caliza Margosa	NO	Destilada
10	DIT14-1001 Caliza Margosa	NO	Zona
11	DIT14-1001 Marga calcárea	NO	Destilada
12	DIT14-1001 Marga calcárea	NO	Zona

Tabla 7.5.1. Características de los ensayos SDT seleccionados.

El parámetro más importante que se obtiene del *Slake Durability Test* es el índice Sehudes (Id_2), que es el índice de desmoronamiento correspondiente al segundo ciclo del SDT y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Id_2 = \frac{C_2 - DA - D}{A} \cdot 100$$

donde:

C_2 es la masa de la tara del tambor con la muestra seca después del segundo ciclo del SDT.

D es la tara del tambor vacío.

A es la tara del tambor vacío con la muestra (húmeda o seca según la variante del ensayo) antes de aplicarle el primer ciclo del SDT.

De la misma forma se pueden obtener los índices de desmoronamiento correspondientes al primer ciclo y a los sucesivos que se le deseen realizar a la muestra.

En esta Tesis se han realizado 6 ciclos del ensayo a cada una de las muestras, después de hacer un análisis de resultados previos para optimizar los ciclos a realizar. Los valores de los índices de desmoronamiento correspondientes se muestran en la Tabla 7.5.2.

Ensayo	Muestra	Id ₁ (%)	Id ₂ (%)	Id ₃ (%)	Id ₄ (%)	Id ₅ (%)	Id ₆ (%)
1	DIT14-201	58.32	42.60	28.68	20.48	14.95	10.20
2	DIT14-201	56.01	41.04	30.15	21.59	15.50	10.25
3	DIT14-201	75.22	58.02	44.15	31.55	18.46	13.71
4	DIT14-201	54.73	42.55	32.69	22.50	13.29	8.44
5	DIT14-601	69.64	63.00	57.40	53.03	50.28	47.47
6	DIT14-601	76.04	68.26	64.31	61.24	58.15	55.96
7	DIT14-601	82.81	68.91	59.21	53.55	49.41	45.90
8	DIT14-601	77.58	70.39	64.53	59.89	55.57	51.86
9	DIT14-1001 Caliza Margosa	10.59	6.11	4.71	3.96	3.47	3.14
10	DIT14-1001 Caliza Margosa	15.73	6.17	4.55	3.96	3.36	3.02
11	DIT14-1001 Marga calcárea	77.61	76.19	75.00	74.02	72.94	72.06
12	DIT14-1001 Marga calcárea	88.32	87.00	85.82	84.87	83.85	83.02

Tabla 7.5.2. Valores del Índice de desmoronamiento de todos los ciclos aplicados a las muestras.

A continuación se explican los detalles de cada uno de los ensayos realizados a las muestras, adjuntando fotografías del aspecto de las muestras tras cada ciclo del ensayo y se realizará una clasificación de durabilidad, basándonos en la Clasificación Durabilidad – Plasticidad recomendada por Gamble (1971).

7.5.1.2. DIT14-201: Alcoy

Introducción

Con las 4 variantes del ensayo que se aplicaron a estas muestras se pretende, además de adquirir una idea sobre el valor del Índice Sehúdes de esta muestra miocena margosa, estudiar la influencia del tipo de agua utilizado en el ensayo con el desmoronamiento de las muestras y la influencia que tiene en los resultados la no realización del secado a estufa inicial.

Variante 1: Muestra húmeda con agua destilada

La Figura 7.5.1 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo

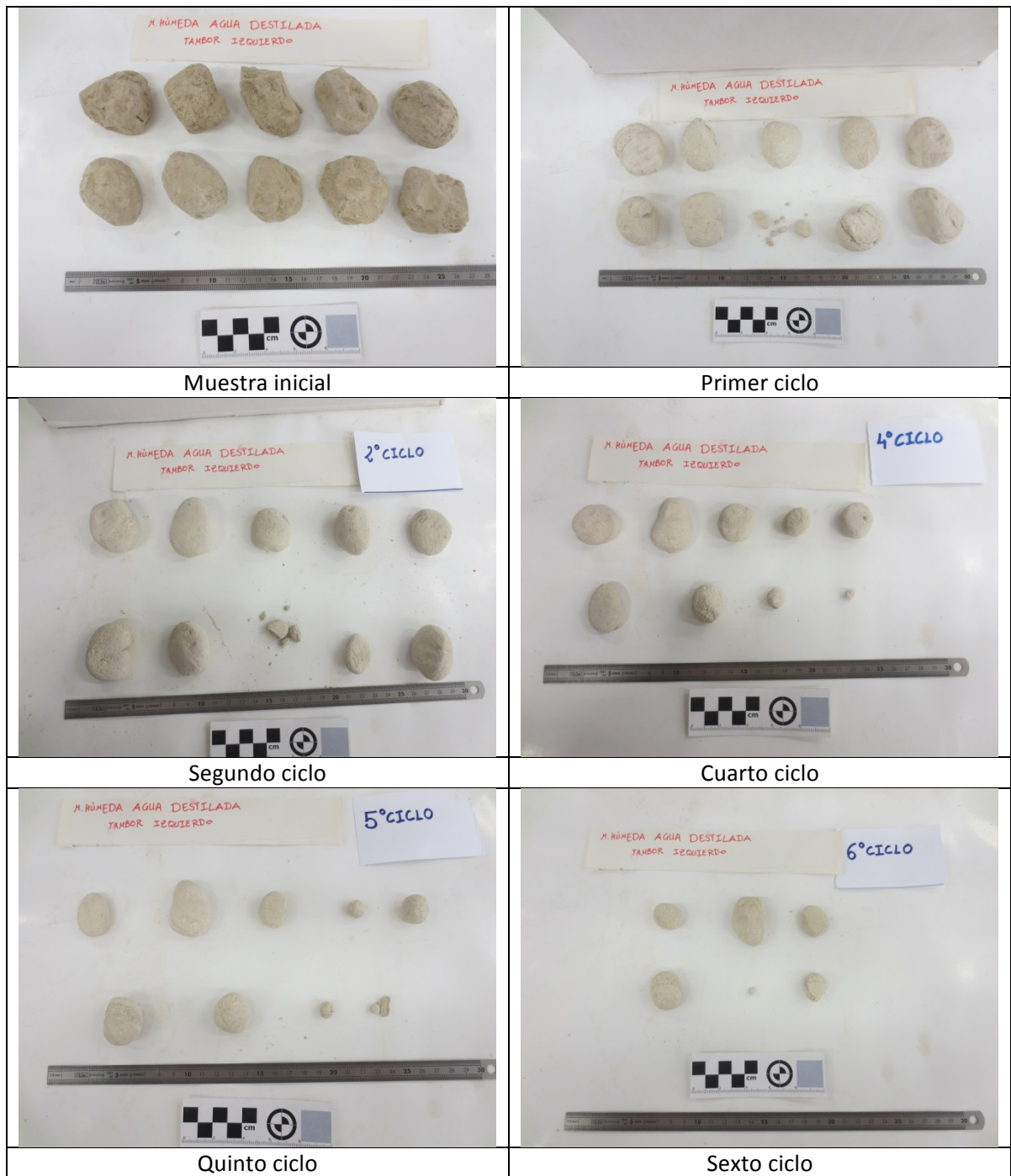


Figura 7.5.1. Aspecto inicial de la muestra y aspecto tras los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-201. Variante 1.

Gamble (1971) clasifica el Índice Sehúdes (I_d) en función de su valor y del Índice de Plasticidad de la muestra, tal como se muestra en la Figura 7.5.2. Así, según este autor, el valor del Índice Sehúdes de esta muestra es bajo.

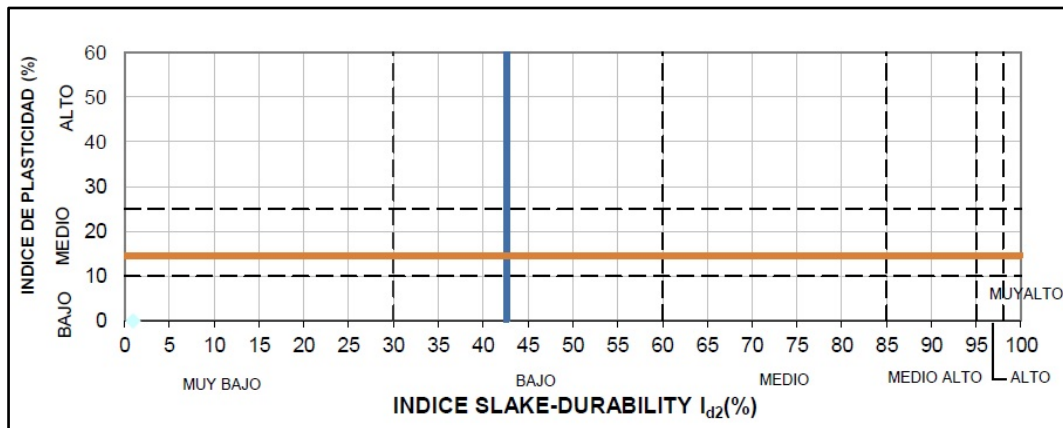


Figura 7.5.2. Clasificación de Gamble. DIT14-201. Variante 1.

En la Figura 7.5.3 se muestra la evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos del ensayo para esta variante del ensayo.

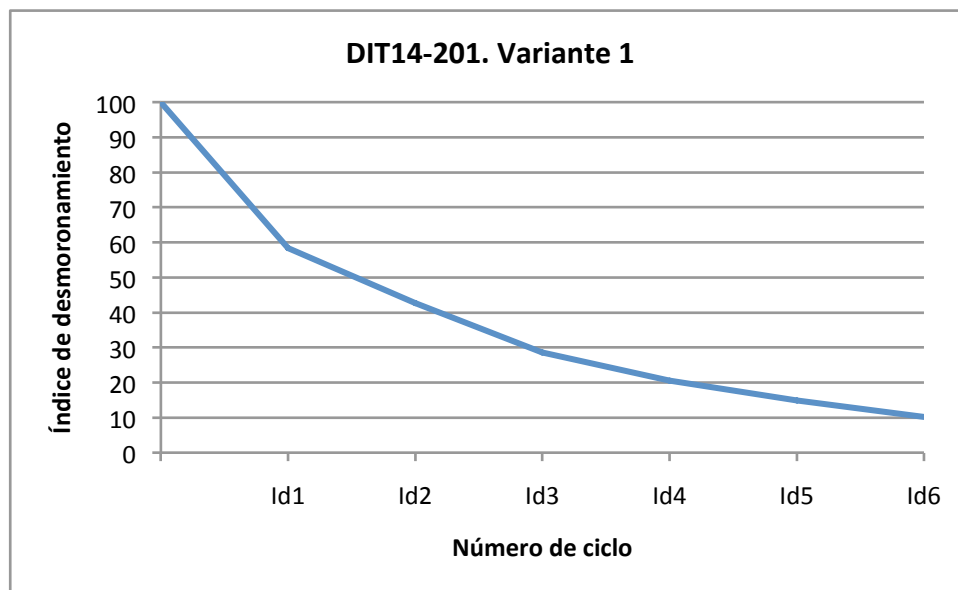


Figura 7.5.3. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-201. Variante 1.

Variante 2: Muestra húmeda con agua de la zona.

La Figura 7.5.4 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

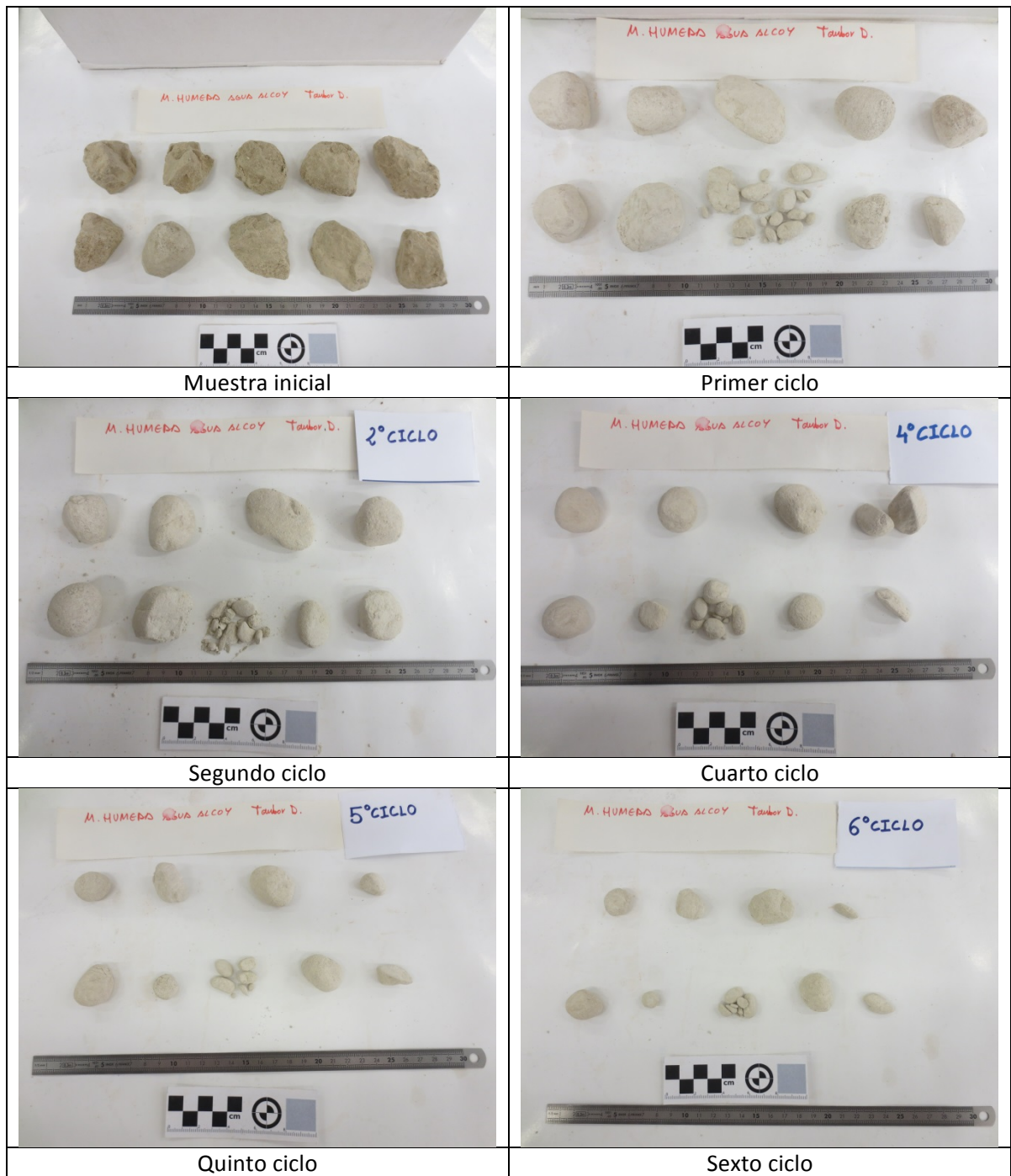


Figura 7.5.4. Aspecto inicial de la muestra y aspecto tras los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-201. Variante 2.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes obtenido de este ensayo es bajo (Figura 7.5.5).

Por su parte, en la Figura 7.5.6 se muestra la evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos del ensayo para esta variante del ensayo.

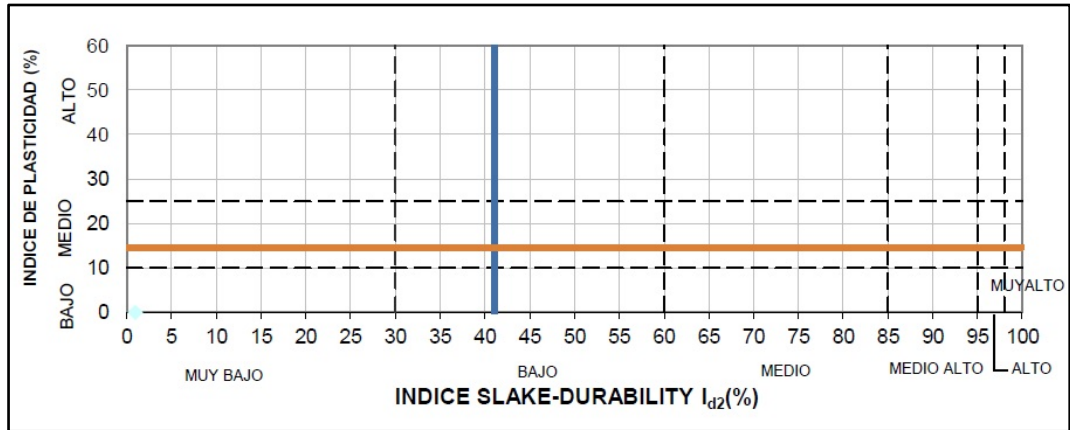


Figura 7.5.5. Clasificación de Gamble. DIT14-201. Variante 2.

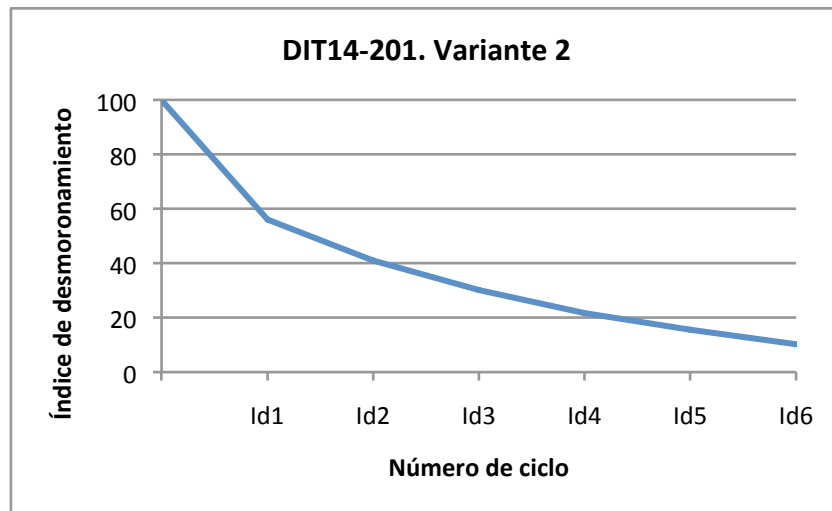


Figura 7.5.6. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-201. Variante 2.

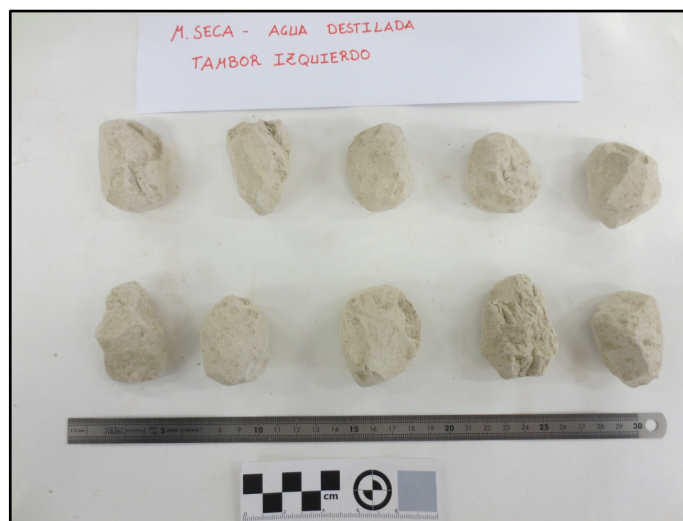


Figura 7.5.7. Aspecto de la muestra antes de comenzar el ensayo. DIT14-201. Variante 3.

Variante 3: Muestra seca con agua destilada.

La Figura 7.5.7 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.8 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el Índice Sehúdes obtenido de este ensayo es bajo (Figura 7.5.9).

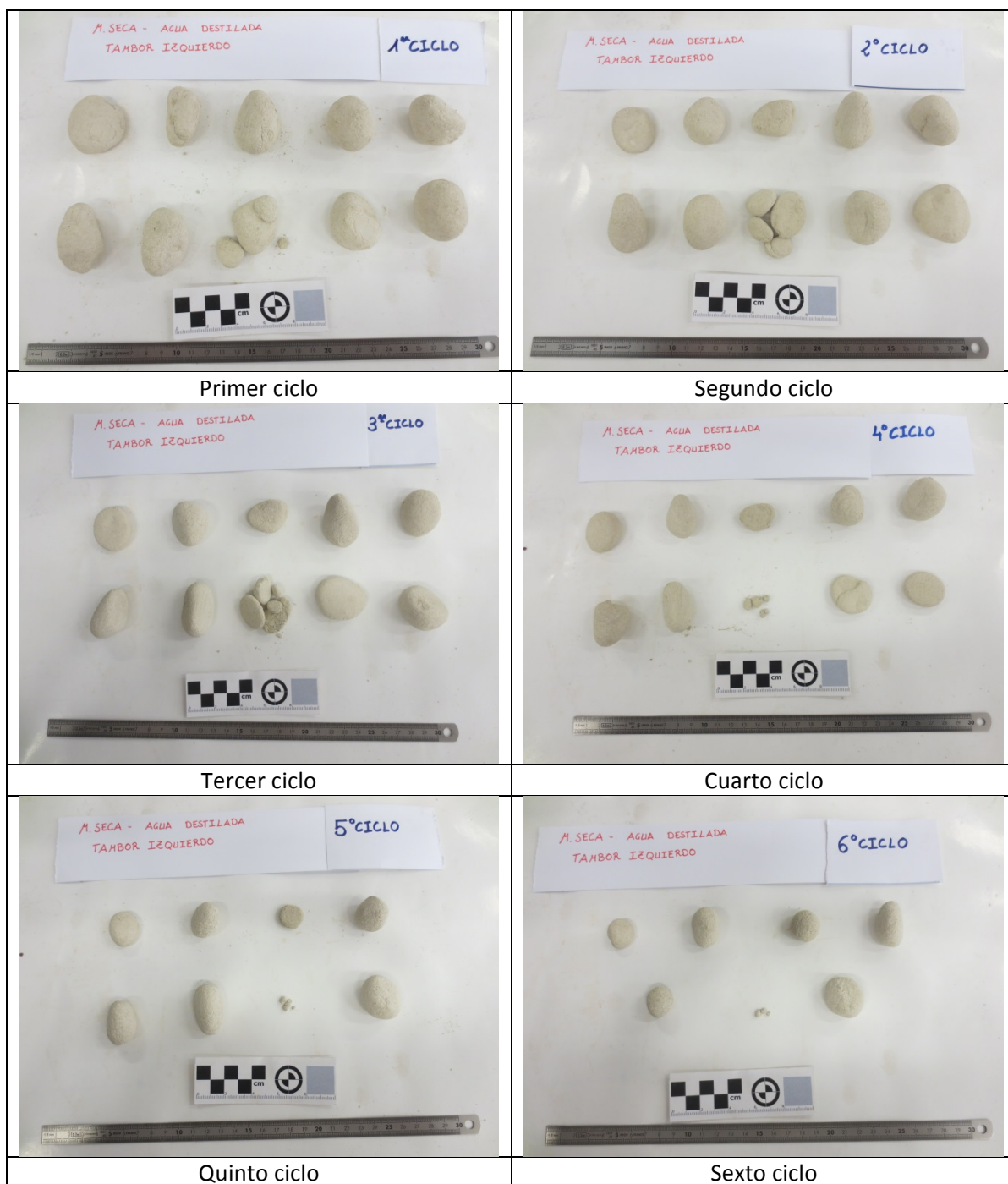


Figura 7.5.8. Aspecto de la muestra tras los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-201.Variante 3.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

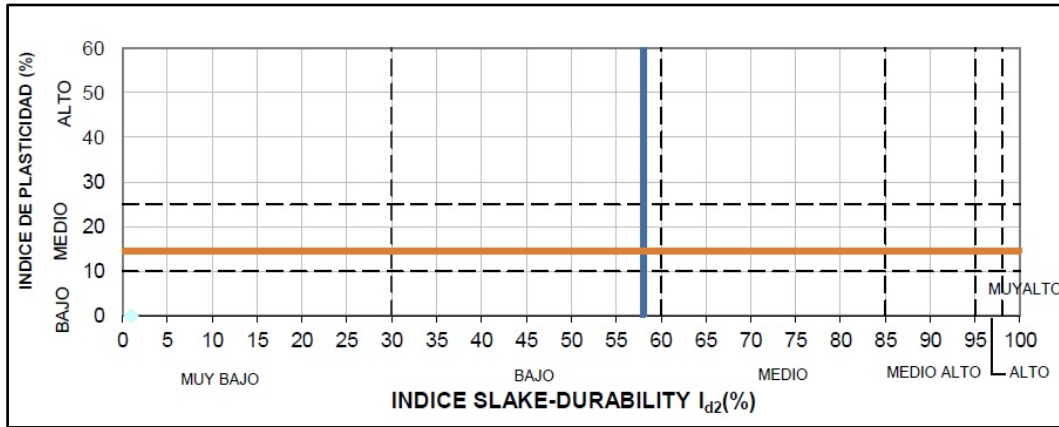


Figura 7.5.9. Clasificación de Gamble (1971). DIT14-201. Variante 3.

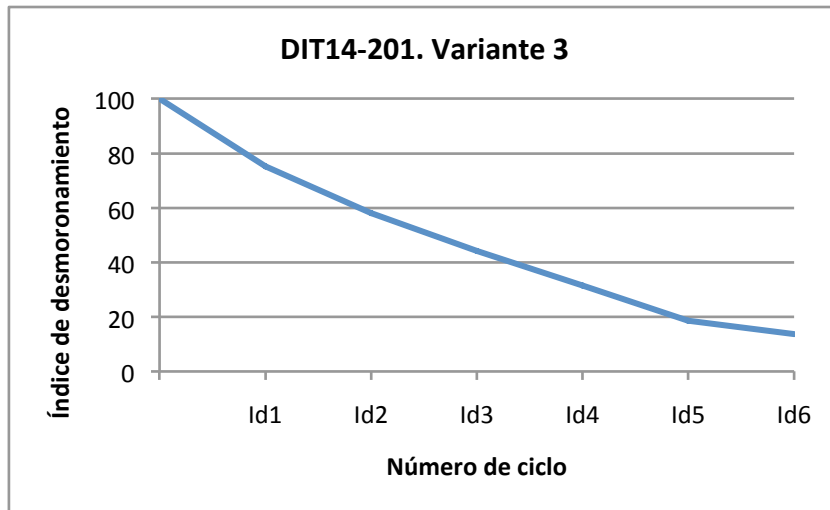


Figura 7.5.10. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-201. Variante 3.



Figura 7.5.11. Aspecto de la muestra al inicio del ensayo. DIT14-201. Variante 4.

Variante 4: Muestra seca con agua de la zona.

La Figura 7.5.11 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.12 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes obtenido de este ensayo es bajo (Figura 7.5.13).

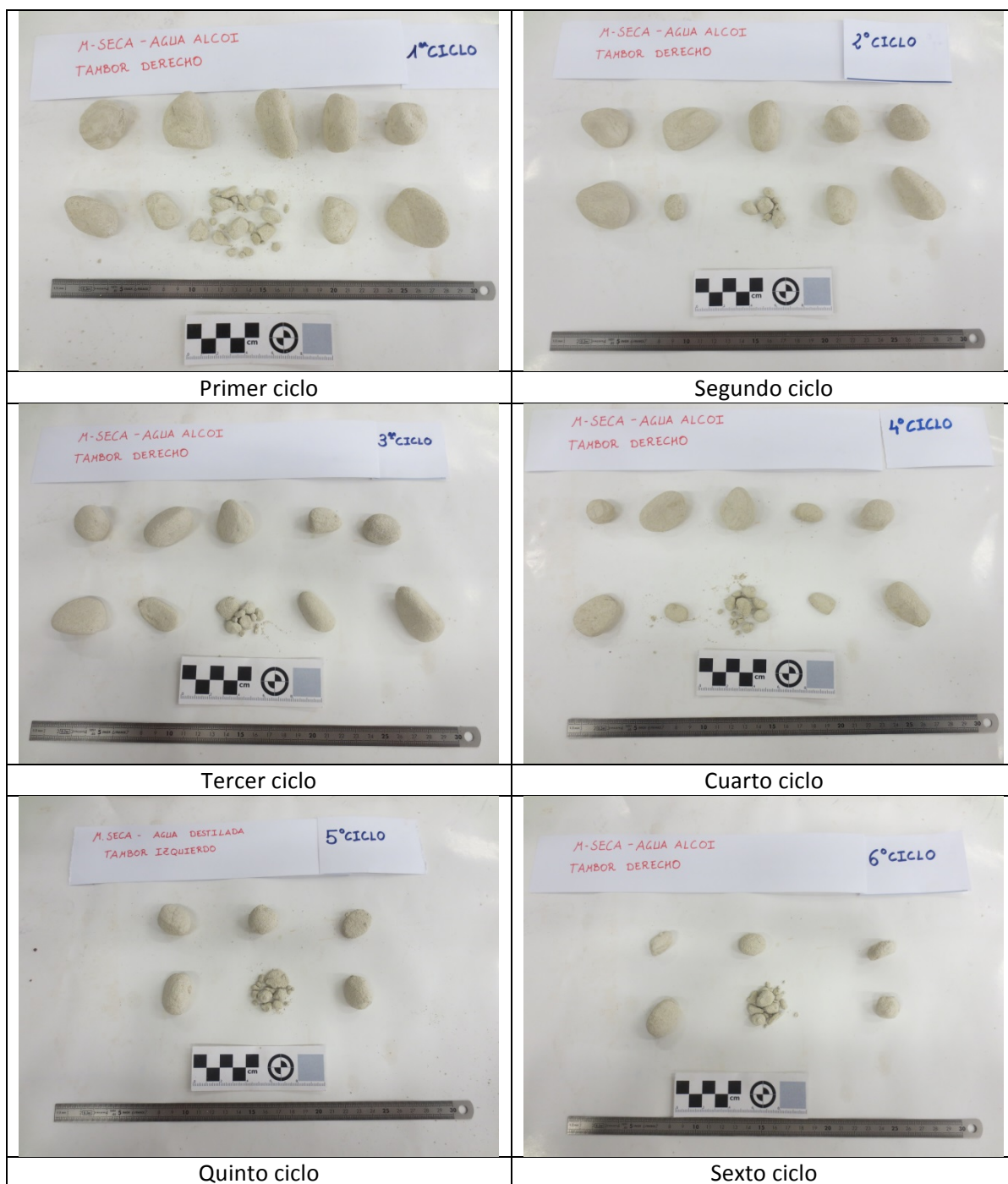


Figura 7.5.12. Aspecto de la muestra tras los sucesivos ciclos del ensayo SDT. DIT14-201. Variante 4.

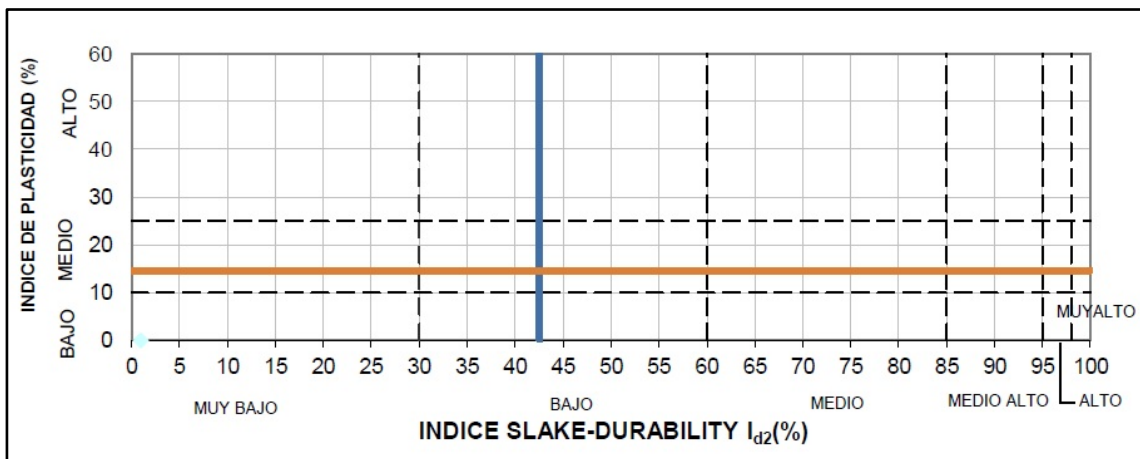


Figura 7.5.13. Clasificación de Gamble. DIT14-201. Variante 4.

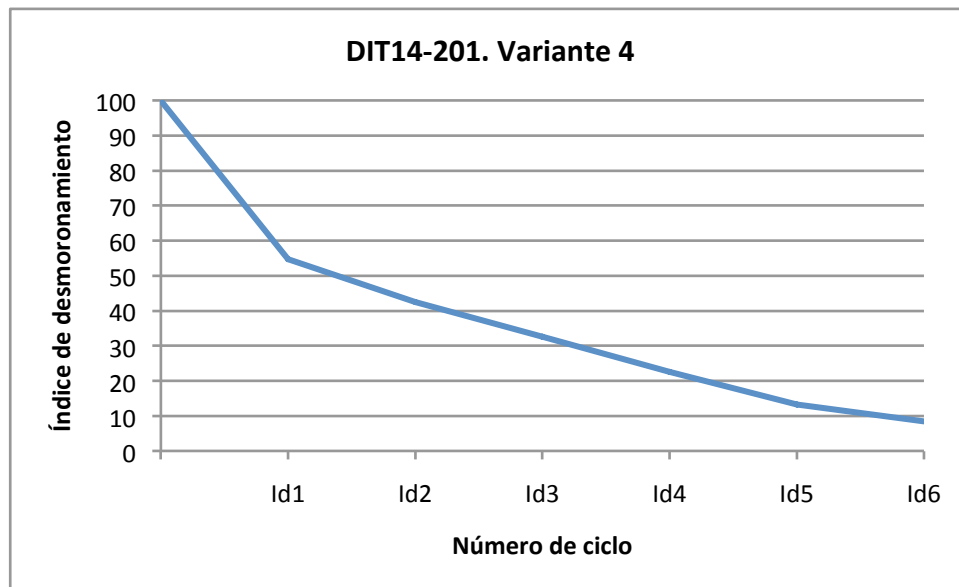


Figura 7.5.14. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-201. Variante 4.

7.5.1.2. DIT14-601: Montaberner

Introducción

Con las 4 variantes del ensayo que se aplicaron a esta muestra se pretende, además de adquirir una idea sobre el valor del Índice Sehdés de esta muestra miocena margosa, estudiar la influencia del tipo de agua utilizado en el ensayo con el desmoronamiento de las muestras y la influencia que tiene en los resultados la no realización del secado a estufa inicial.

Variante 5: Muestra húmeda y agua destilada

La Figura 7.5.15 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.16 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.



Figura 7.5.15. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-601. Variante 5.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes (I_d) obtenido de este ensayo es medio (Figura 7.5.17).



Figura 7.5.16. Aspecto de la muestra tras sucesivos ciclos del Slake. DIT14-601. Variante 5.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

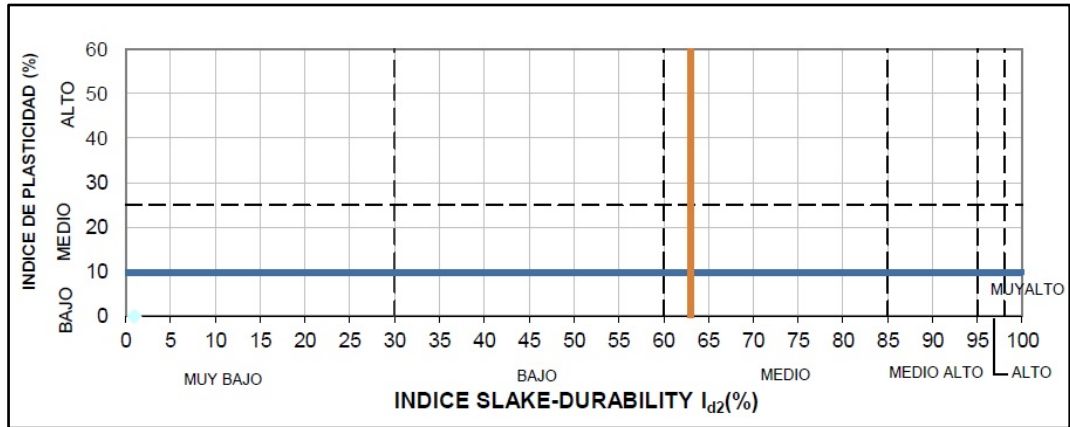


Figura 7.5.17. Clasificación de Gamble (1971). DIT14-601. Variante 5.

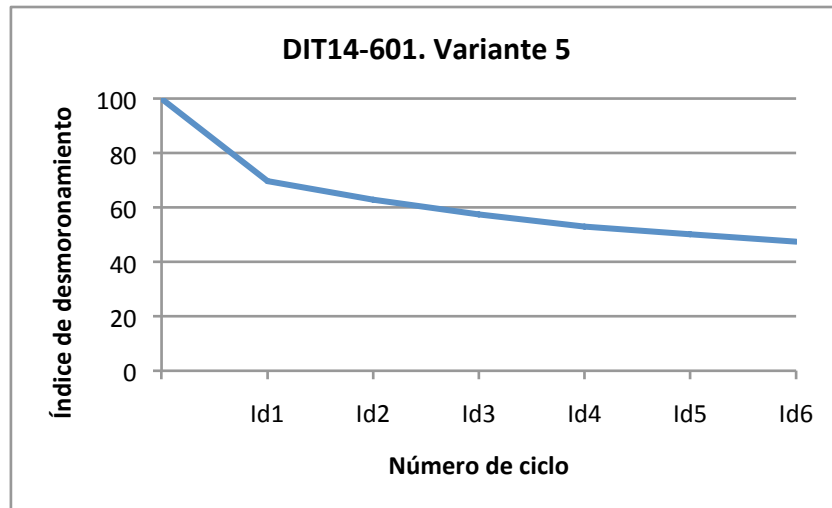


Figura 7.5.18. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos de ensayo. DIT14-601. Variante 5.



Figura 7.5.19. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-601. Variante 6.

Variante 6: Muestra húmeda y agua de la zona.

La Figura 7.5.19 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.20 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el valor obtenido del Índice Sehúdes es medio (Figura 7.5.21).



Figura 7.5.20. Evolución del aspecto de la muestra tras los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-601. Variante 6.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

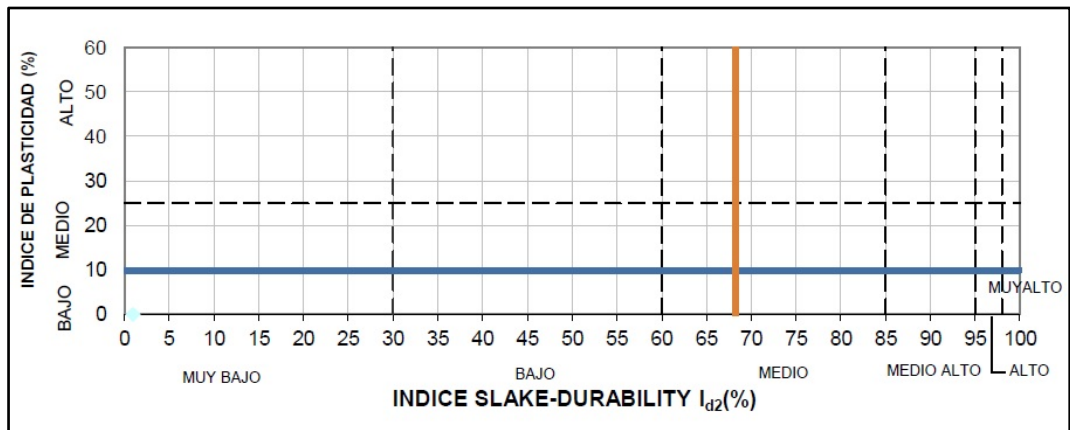


Figura 7.5.21. Clasificación de Gamble. DIT14-601. Variante 6.

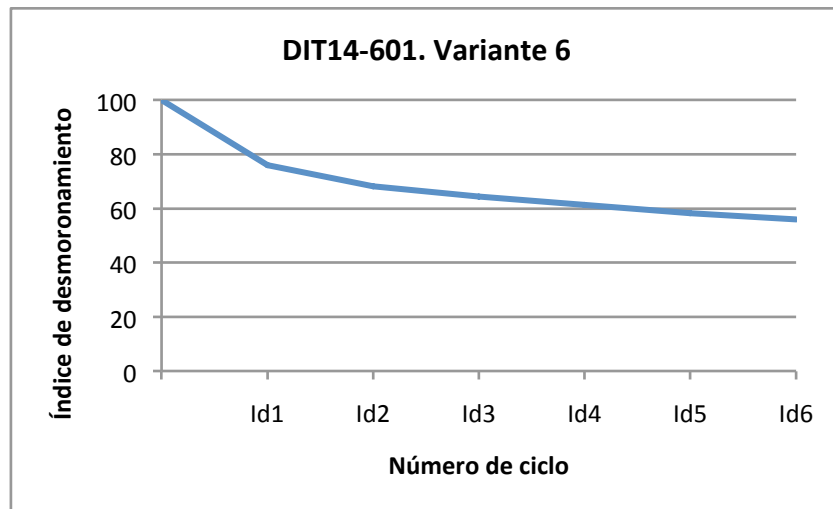


Figura 7.5.22. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-601. Variante 6.

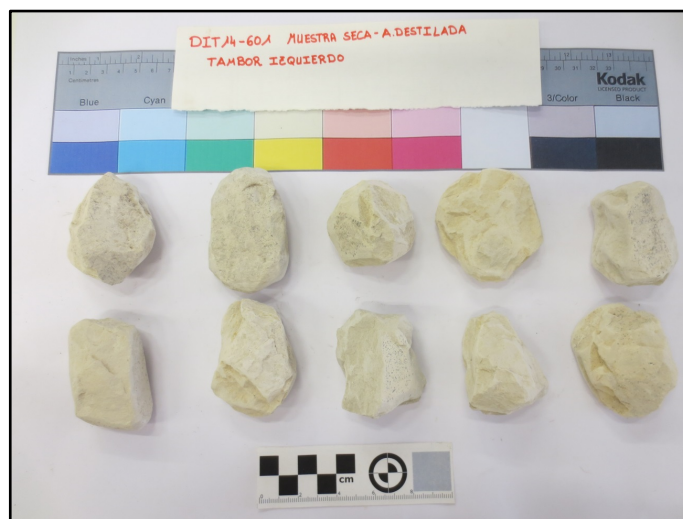


Figura 7.5.23. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-601. Variante 7.

Variante 7: Muestra seca y agua destilada

La Figura 7.5.23 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.24 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes obtenido en el ensayo es medio (Figura 7.5.25).



Figura 7.5.24. Evolución del aspecto de la muestra con los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-601. Variante 7.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

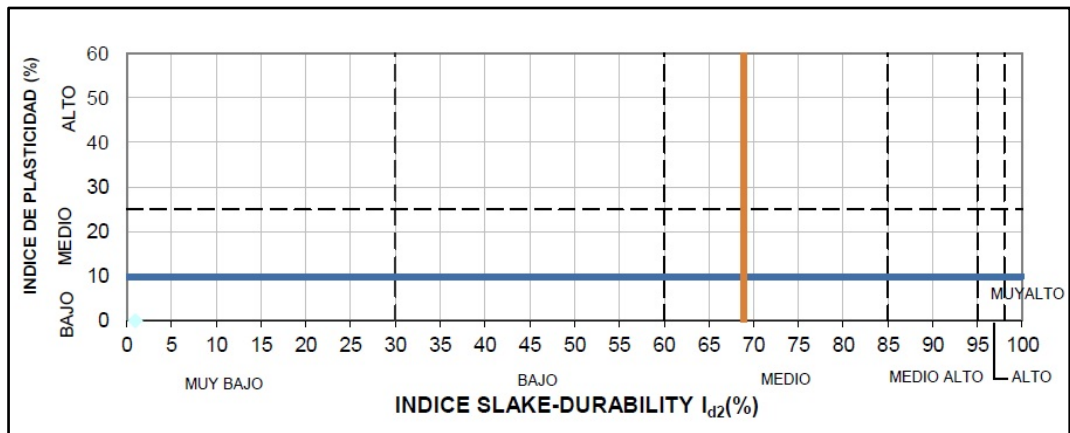


Figura 7.5.25. Clasificación de Gamble. DIT14-601. Variante 7.

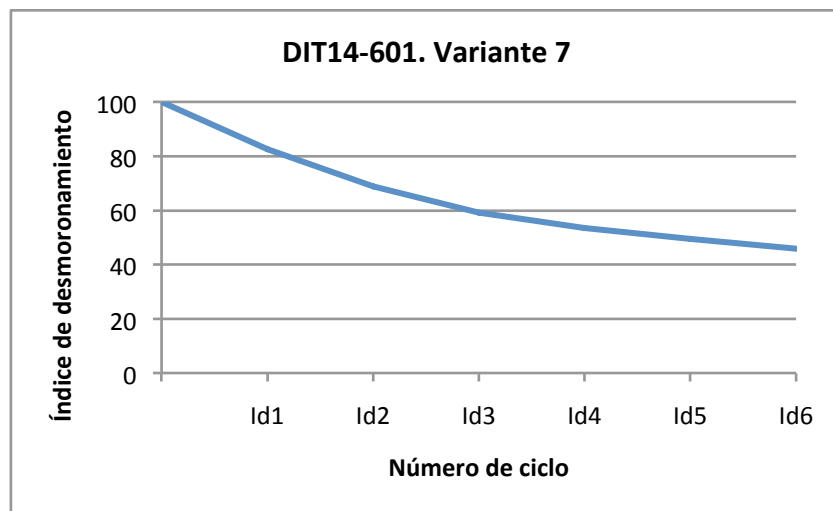


Figura 7.5.26. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-601. Variante 7.

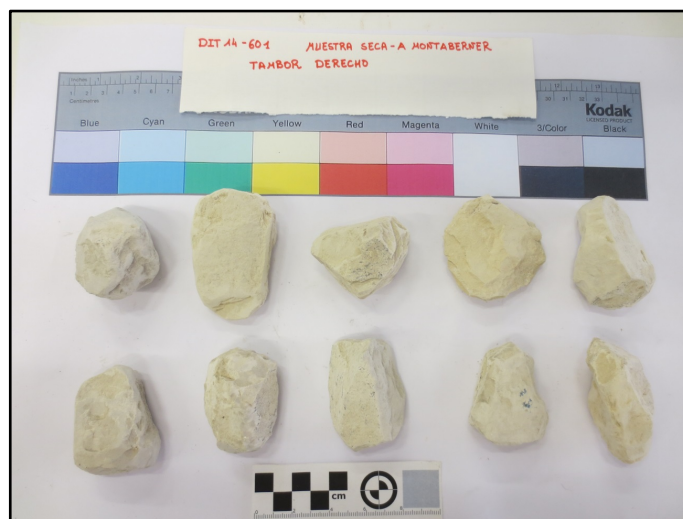


Figura 7.5.27. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-601. Variante 8.

Variante 8: Muestra seca y agua destilada

La Figura 7.5.27 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.28 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes obtenido en el ensayo es medio (Figura 7.5.29).



Figura 7.5.27. Evolución del aspecto de la muestra con los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-601. Variante 8.

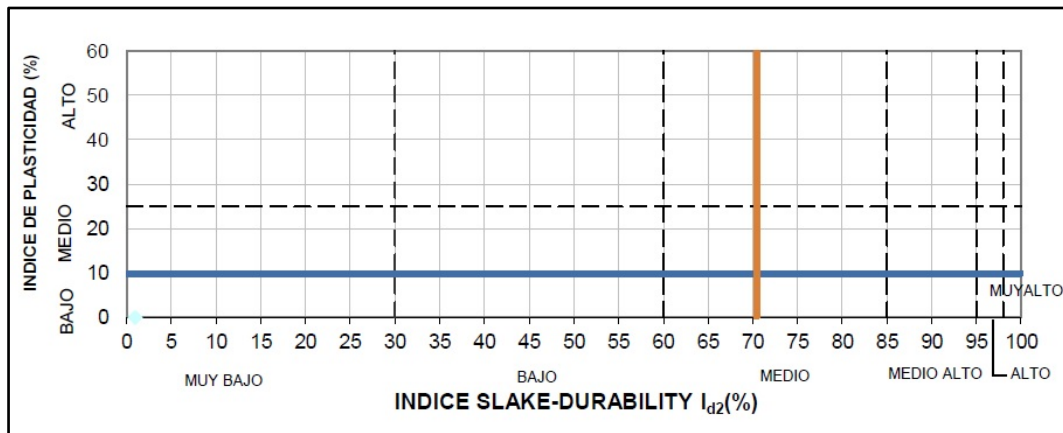


Figura 7.5.28. Clasificación de Gamble (1971). DIT14-601. Variante 8.

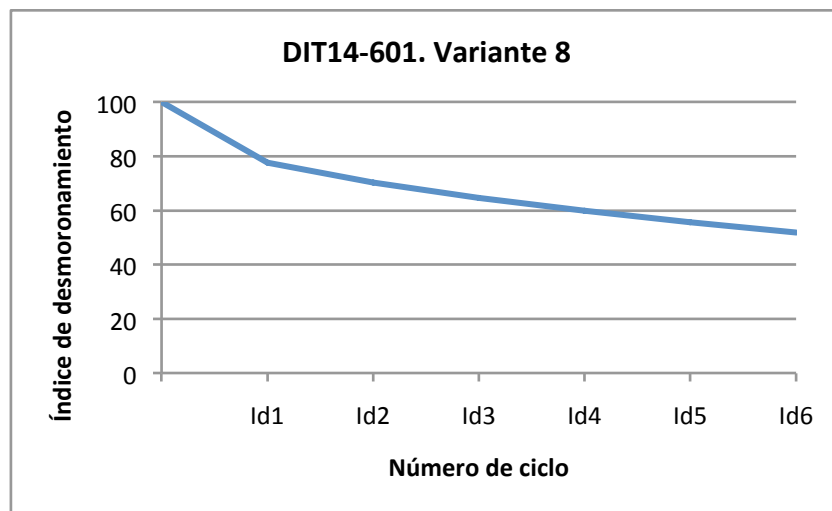


Figura 7.5.29. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-601. Variante 8.

7.5.1.4. DIT14-1001: Benisa

Introducción

Con las 4 variantes del ensayo que se aplicaron a estas muestras se pretende, además de adquirir una idea sobre el valor del Índice Sehdés de esta muestra miocena margosa, estudiar la influencia del tipo de agua utilizado en el ensayo con el desmoronamiento de las muestras y comparar los resultados para predecir problemas de erosión diferencial que se pueden producir en este material debido a su heterogeneidad (comparativa entre las muestras conformadas por calizas margosas muy carbonatadas y las muestras conformadas por fragmentos de roca poco meteorizada de margas calcáreas).

Variante 9: Caliza margosa y agua destilada

La Figura 7.5.30 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.31 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

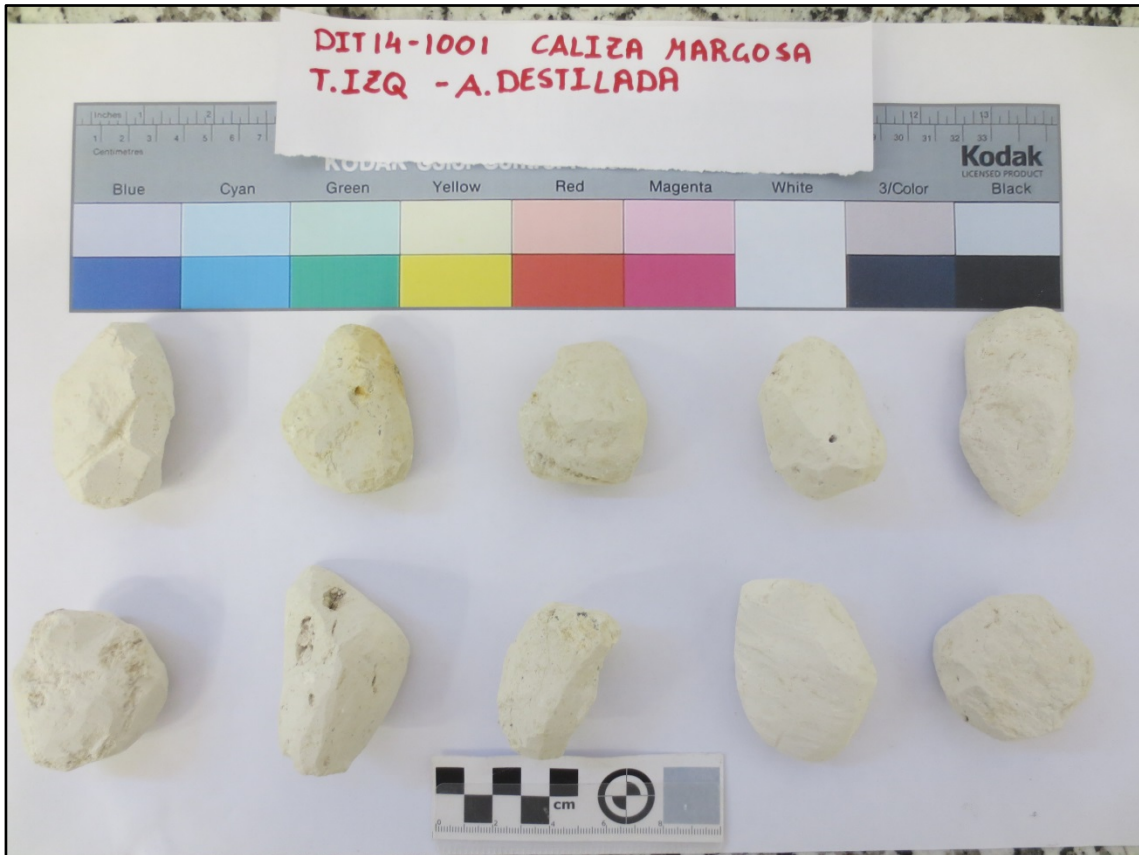


Figura 7.5.30. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-1001. Variante 9.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes (I_d2) obtenido en el ensayo es muy bajo (Figura 7.5.32).

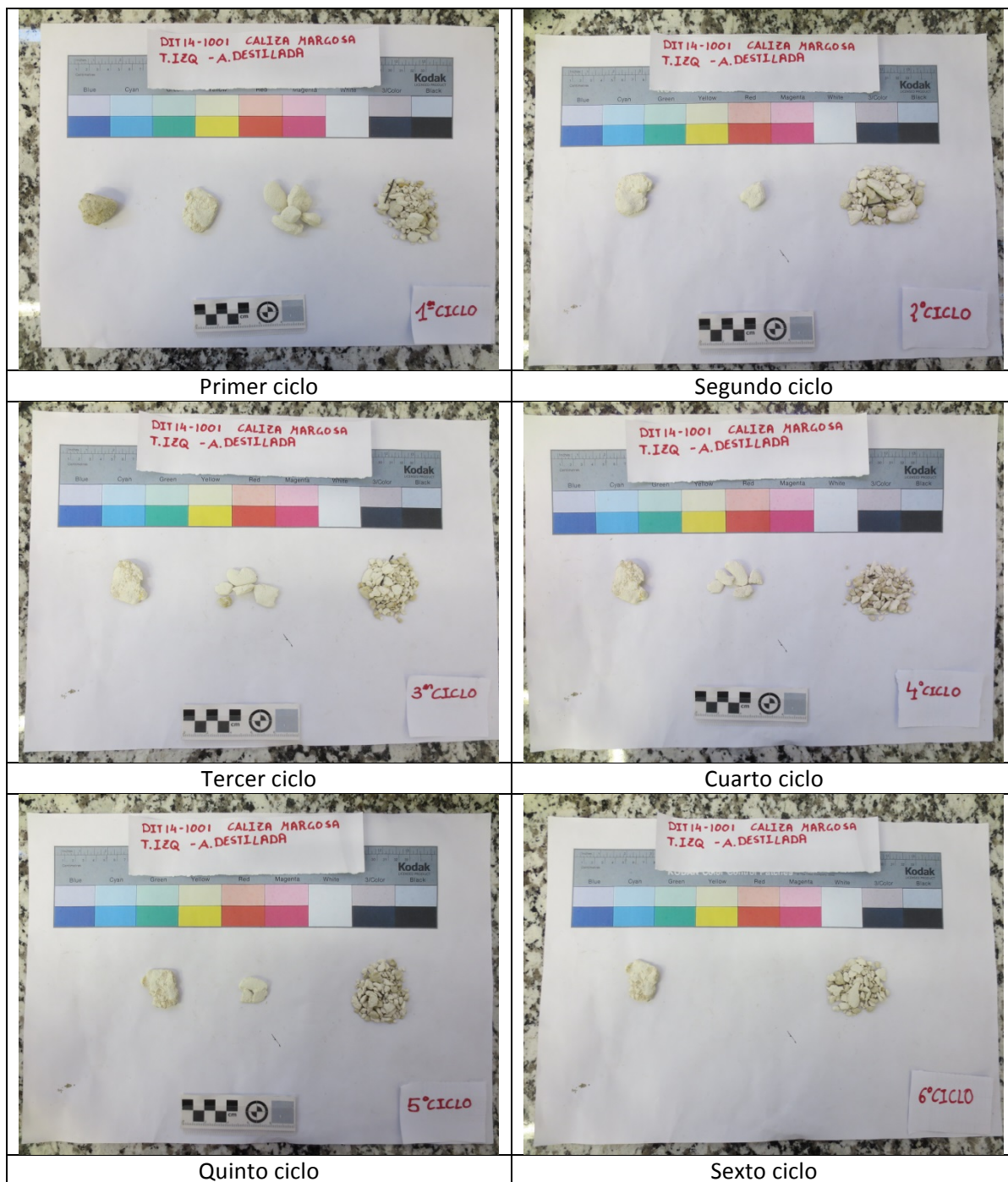


Figura 7.5.31. Evolución del aspecto de la muestra con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 9.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

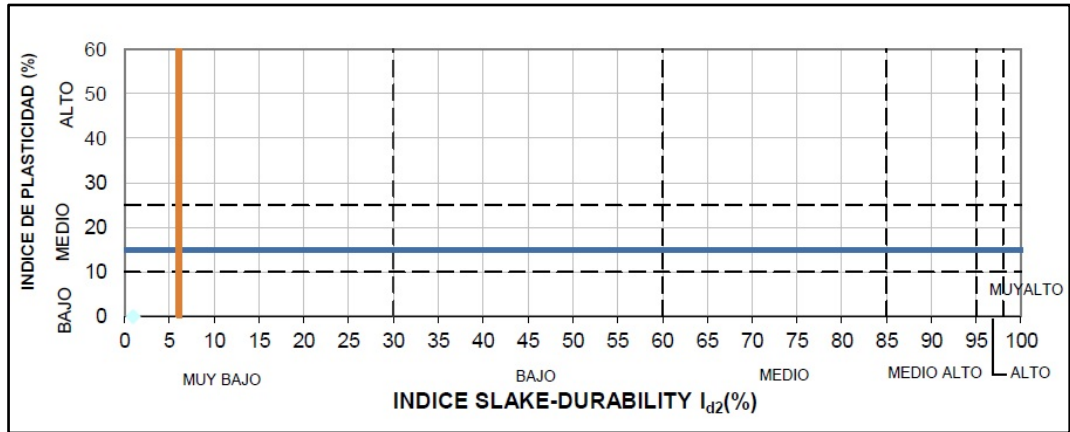


Figura 7.5.32. Clasificación de Gamble (1971). DIT14-1001. Variante 9.

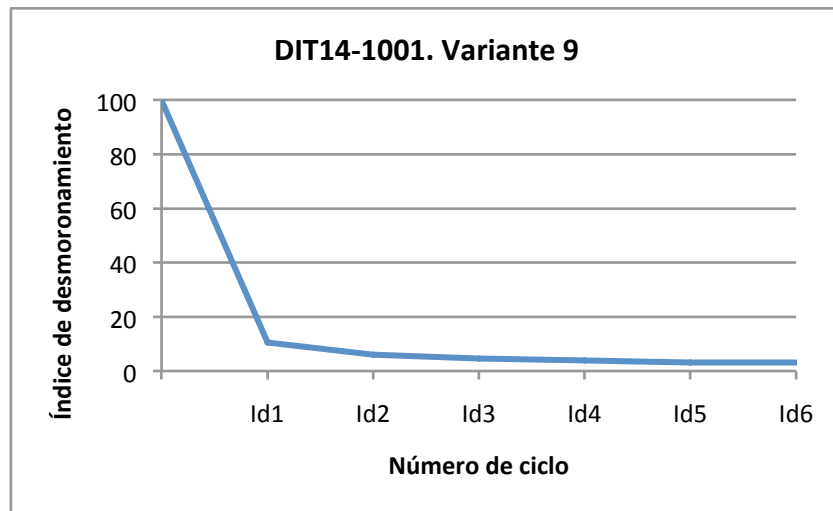


Figura 7.5.33. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 9.

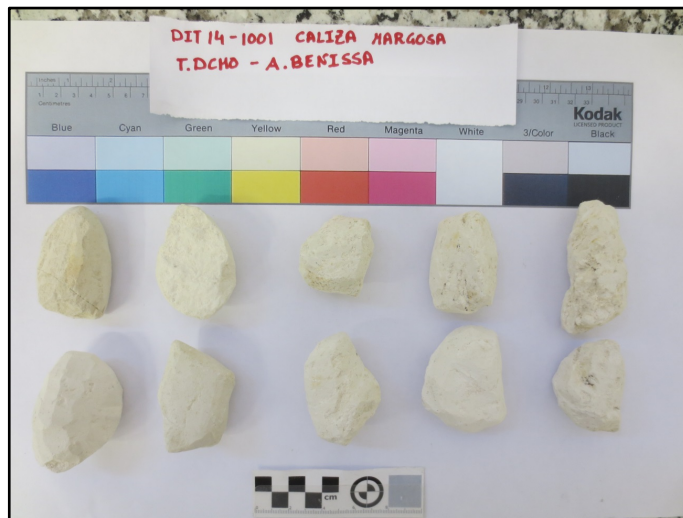


Figura 7.5.34. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-1001. Variante 10.

Variante 10: Caliza margosa y agua de la zona

La Figura 7.5.34 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.35 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el Índice Sehúdes obtenido de este ensayo es muy bajo (Figura 7.5.36).

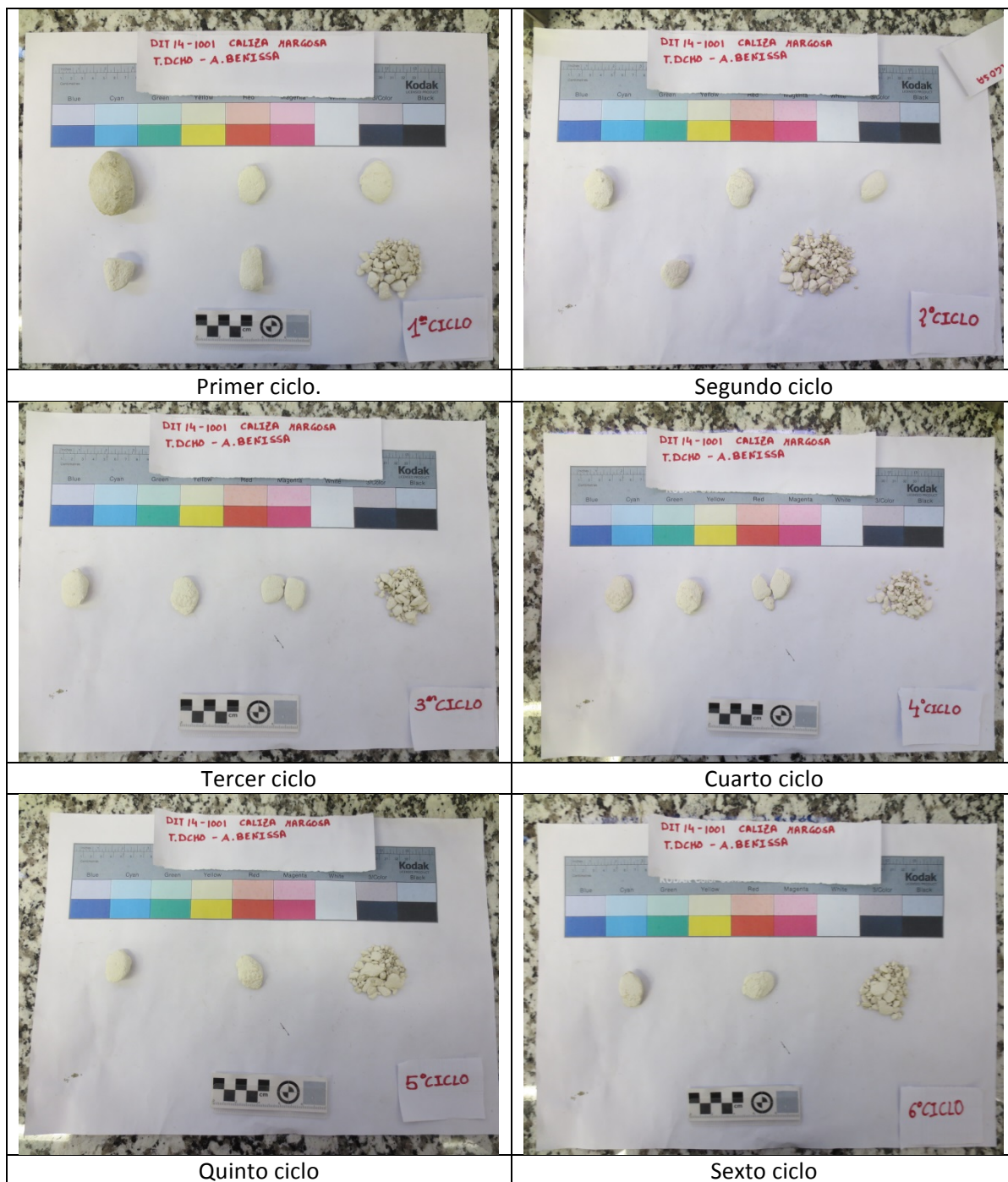


Figura 7.5.35. Evolución del aspecto de la muestra con los sucesivos ciclos del ensayo. DIT14-1001. Variante 10.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

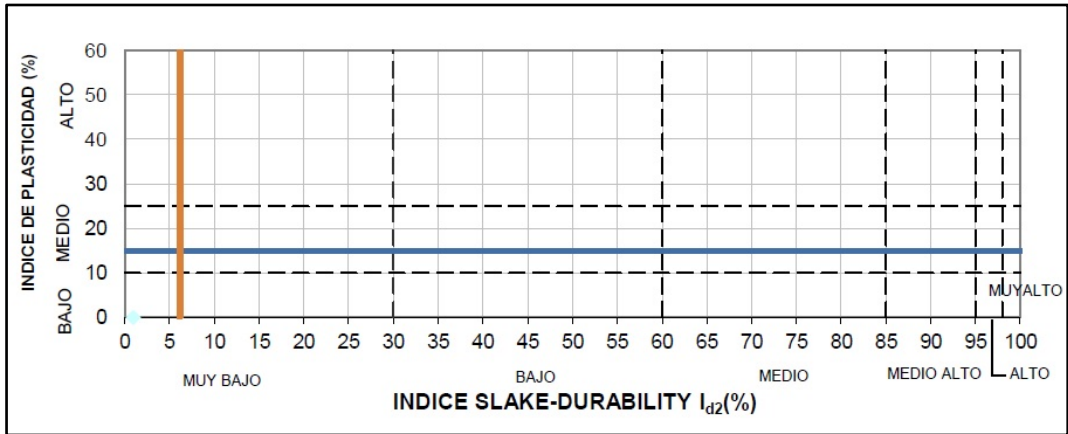


Figura 7.5.36. Clasificación de Gamble (1971). DIT14-1001. Variante 10.

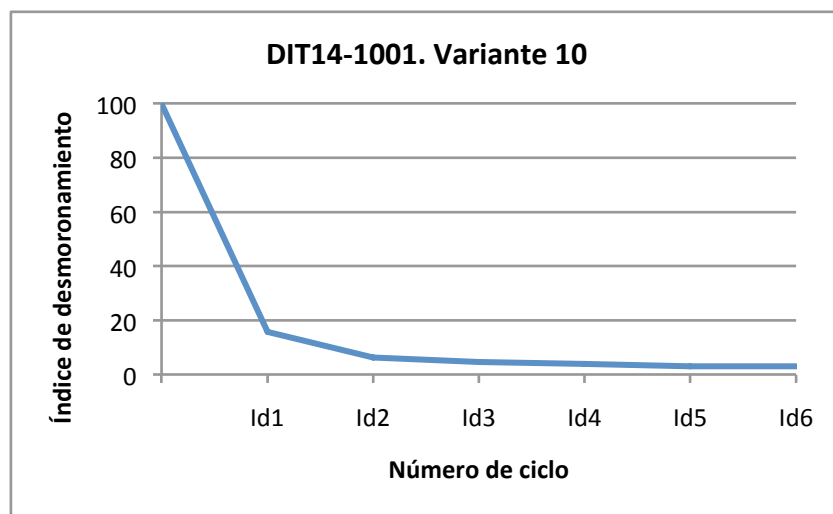


Figura 7.5.37. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 10.



Figura 7.5.38. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-1001. Variante 11.

Variante 11: Marga calcárea y agua destilada

La Figura 7.5.38 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.39 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el valor del Índice Sehúdes de la muestra es medio (Figura 7.5.40).



Figura 7.5.39. Evolución del aspecto de la muestra con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 11.

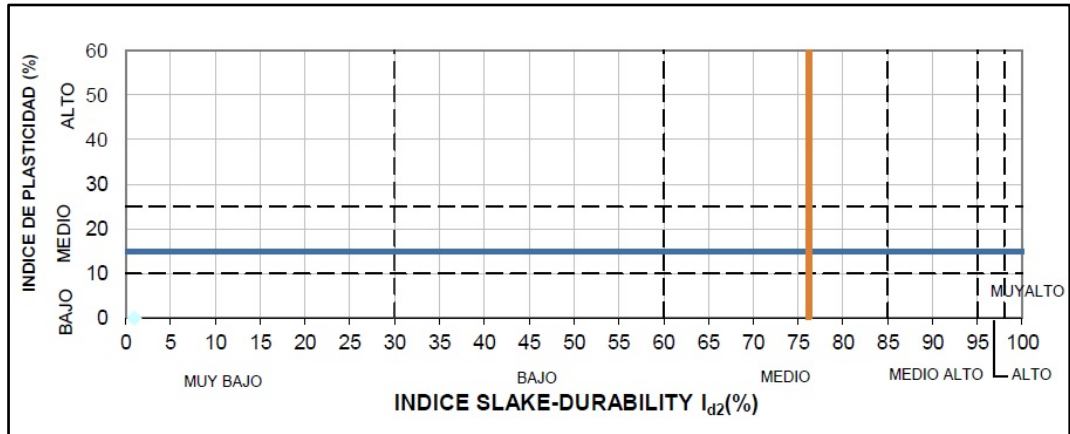


Figura 7.5.40. Clasificación de Gamble (1971). DIT14-1001. Variante 11.

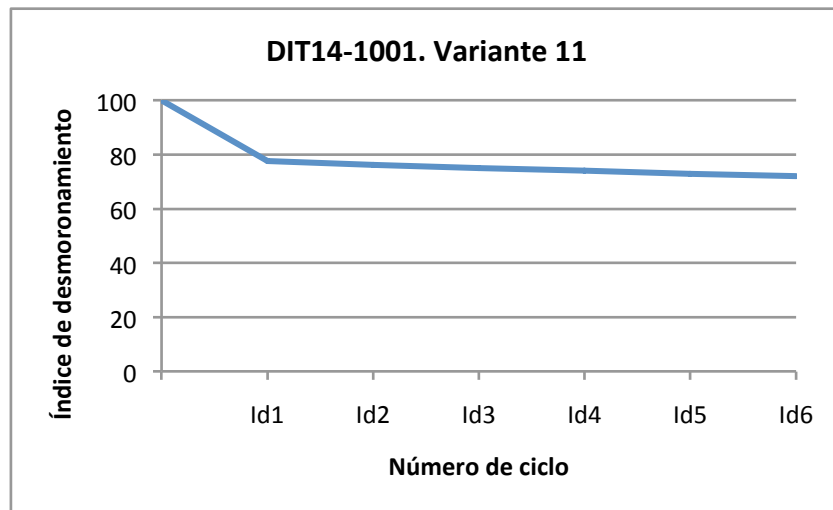


Figura 7.5.41. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 11.

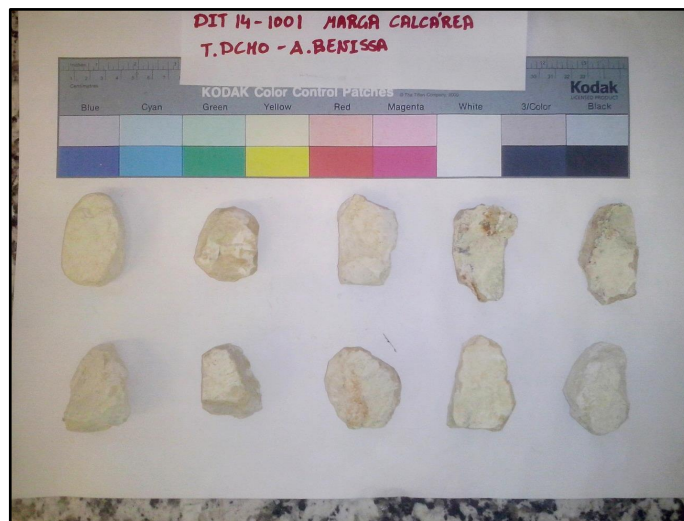


Figura 7.5.42. Aspecto inicial de la muestra. DIT14-1001. Variante 12.

Variante 12: Caliza margosa y agua de la zona

La Figura 7.5.42 muestra el aspecto inicial de la muestra antes de haberle sido aplicado ningún ciclo del ensayo y la Figura 7.5.43 el aspecto de la muestra tras los correspondientes ciclos de desmoronamiento del ensayo.

Según Gamble (1971) el Índice de Sehúdes es medio-alto (Figura 7.5.44).



Figura 7.5.43. Evolución del aspecto de las muestras con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 12.

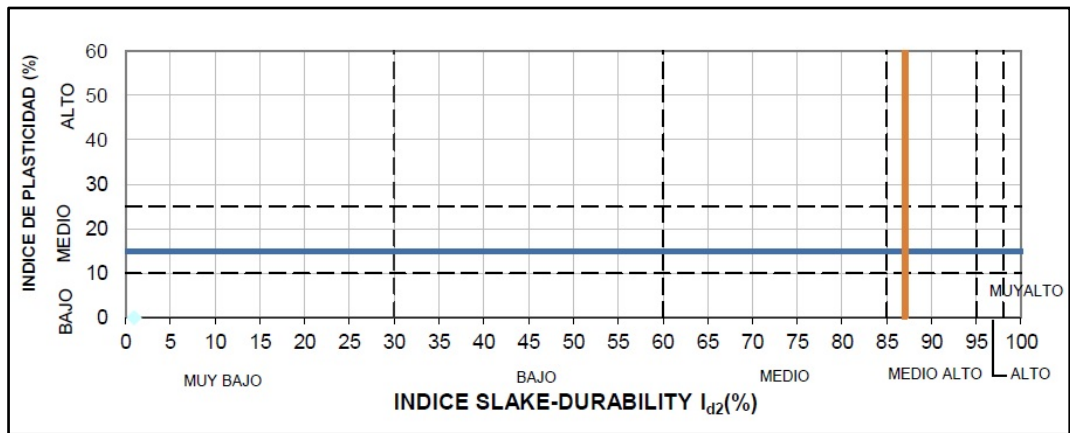


Figura 7.5.44. Clasificación de Gamble. DIT14-1001.Variante 12.

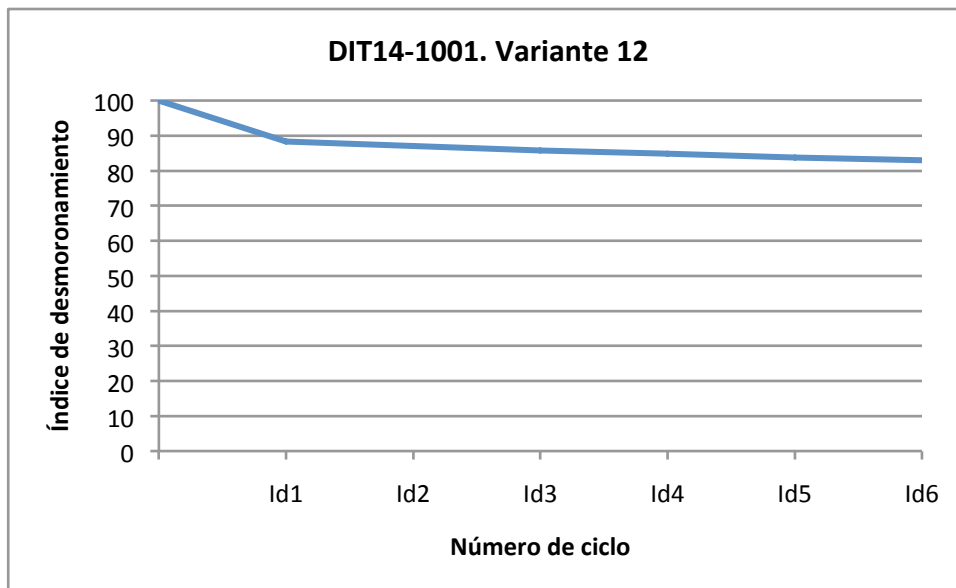


Figura 7.5.45. Evolución del Índice de desmoronamiento con los sucesivos ciclos. DIT14-1001. Variante 12.

7.5.2 Ensayo Dusseault

Se realizó el ensayo de inmersión estática – Dusseault con tres fragmentos de roca de varias muestras de la zona DIT14-601 (Montaberner). En las Figuras 7.5.46 a 7.4.48 se muestran tres muestras ensayadas, que se consideran representativas, y cuyas masas se muestran en la Tabla 7.5.3.

Referencia	M9	P	402
Masa (g)	172.17	166.62	540.57

Tabla 8. Masa de los fragmentos de roca considerados representativos. DIT14-601.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio



Figura 7.5.46. Fragmento de roca M9. DIT14-601.

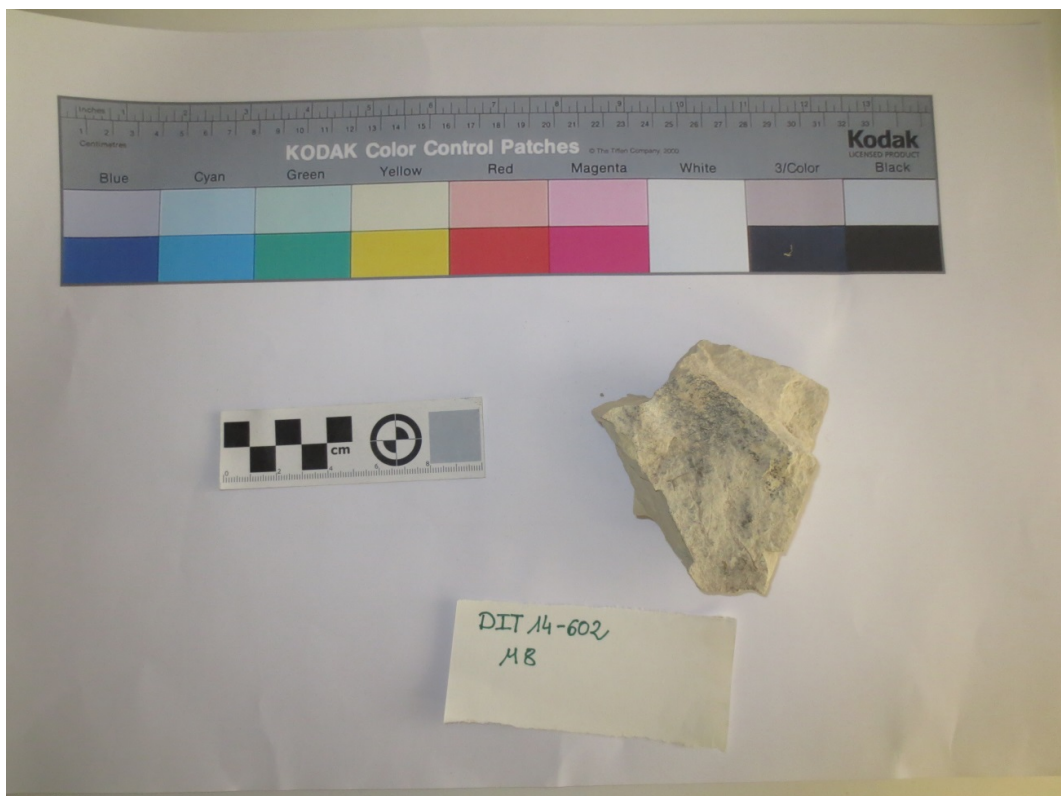


Figura 7.5.47. Fragmento de roca P. DIT14-601.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio



Figura 7.5.48. Fragmento de roca 402. DIT14-601.

Se introdujo cada una de ellas en un vaso de vidrio que se llenó de agua destilada hasta una altura suficiente para sumergir la muestra totalmente (Figura 7.5.49 a 7.5.51).

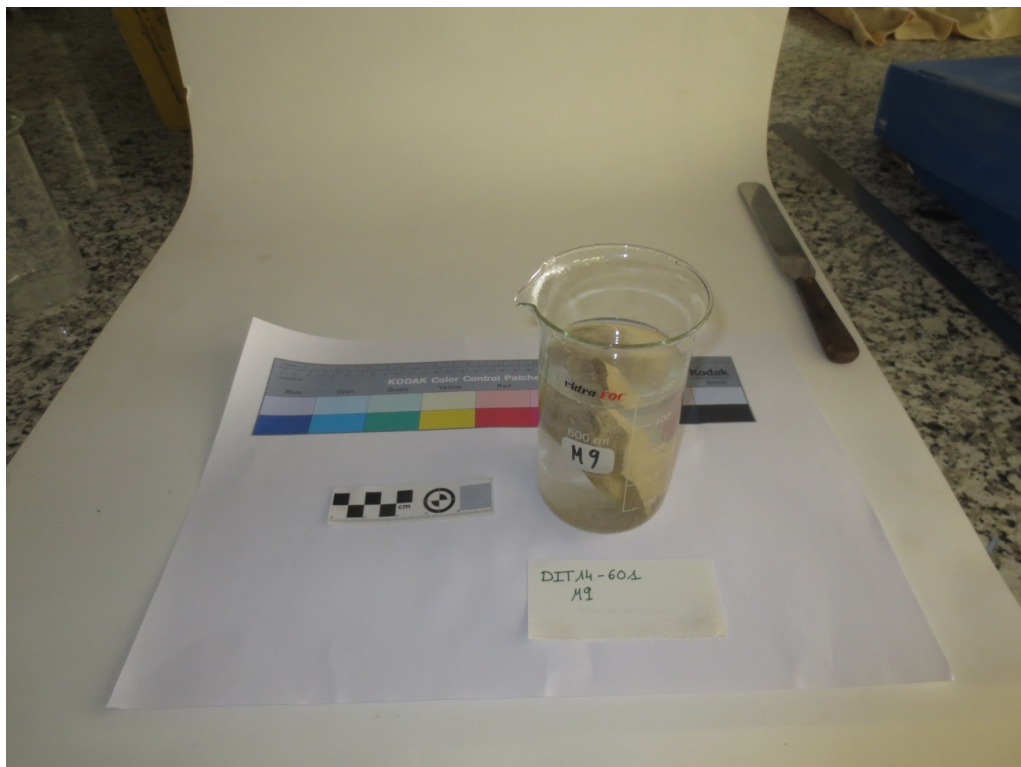


Figura 7.5.49. Inicio ensayo Dusseault, muestra M9. DIT14-601.

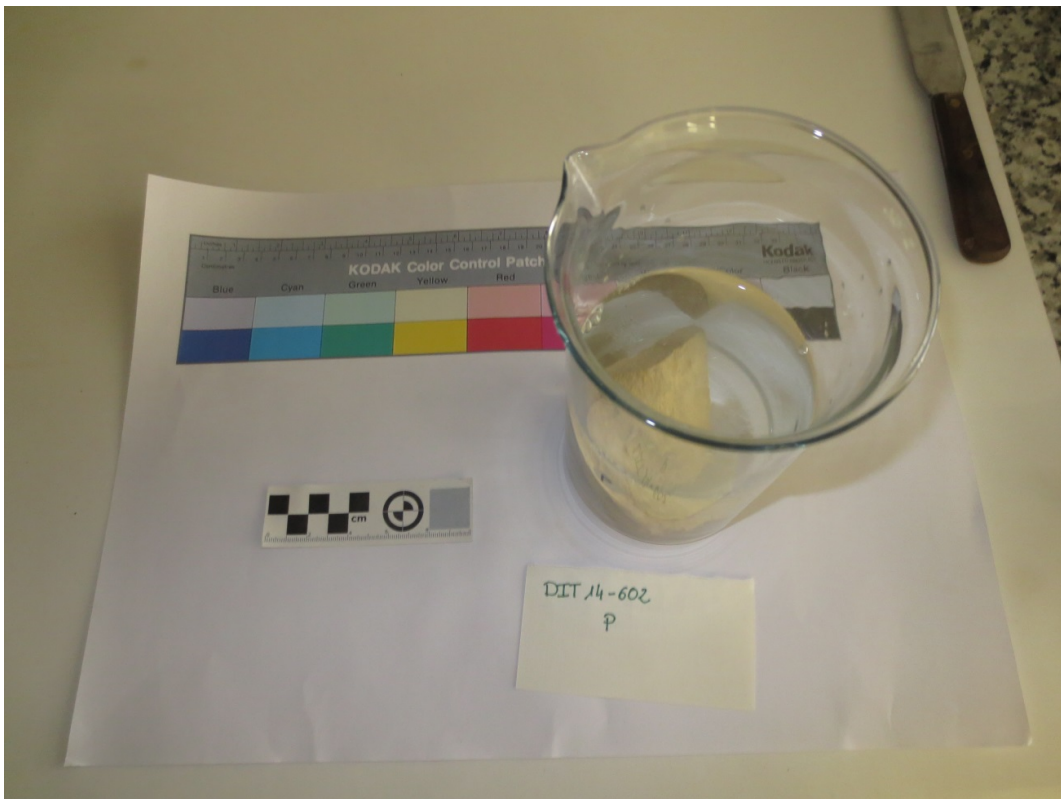


Figura 7.5.50. Inicio ensayo Dusseault, muestra P. DIT14-601.

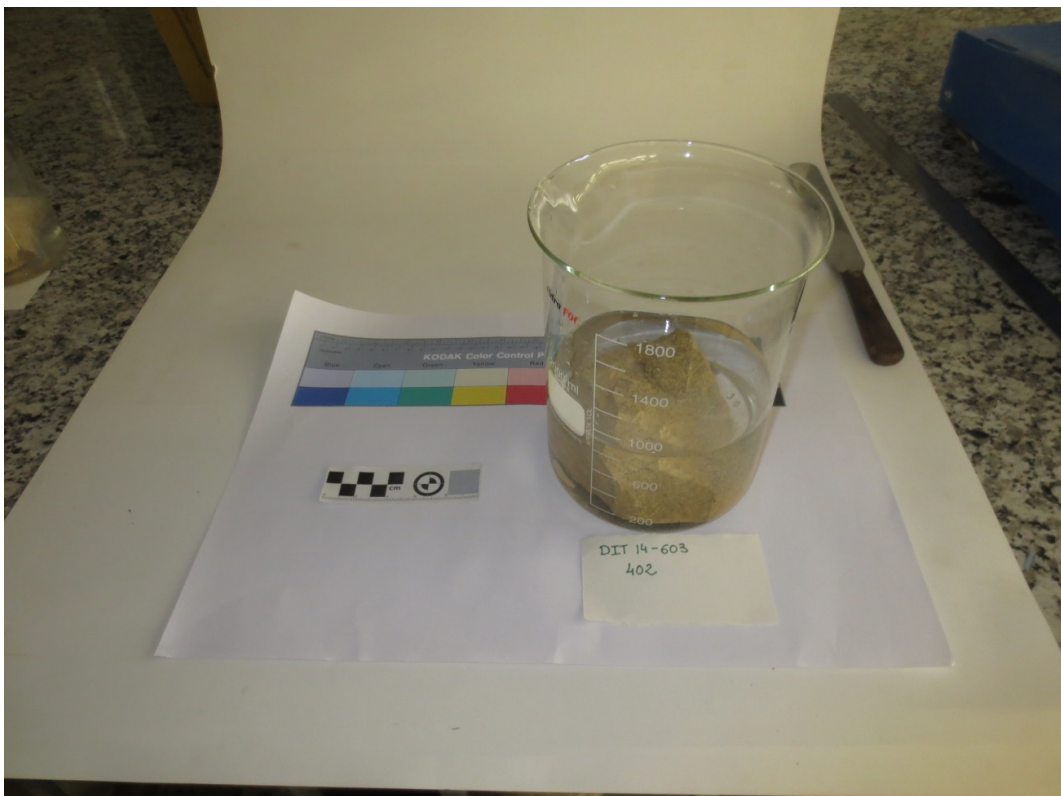


Figura 7.5.51. Inicio ensayo Dusseault, muestra 402. DIT14-601.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

Se describió la reacción de la muestra en una escala de tiempos de tipo logarítmica: 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 30, 60 min hasta un mínimo de 24 horas. Para ello se utilizaron los criterios de la Tabla 7.5.4 obteniéndose la gráfica que aparece en la Figura 7.5.52.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
A	Sin deterioro visible.
B	Algún deterioro (agua limpia, pocos fragmentos o esquirlas).
C	Deterioro medio. Se conserva la forma original pero su superficie está deteriorada.
C1	El agua se enturbia.
C2	El agua está limpia.
D	Gran deterioro. La forma original se destruye casi por completo, saltando fragmentos o esquirlas.
D1	El agua está muy turbia.
D2	El agua está algo turbia.
E	Desintegración total.
E1	El agua queda totalmente turbia.
E2	El agua queda algo turbia.
E3	El agua queda limpia.

Tabla 7.5.4. Determinación de la durabilidad. Dusseault *et al.* (1983).

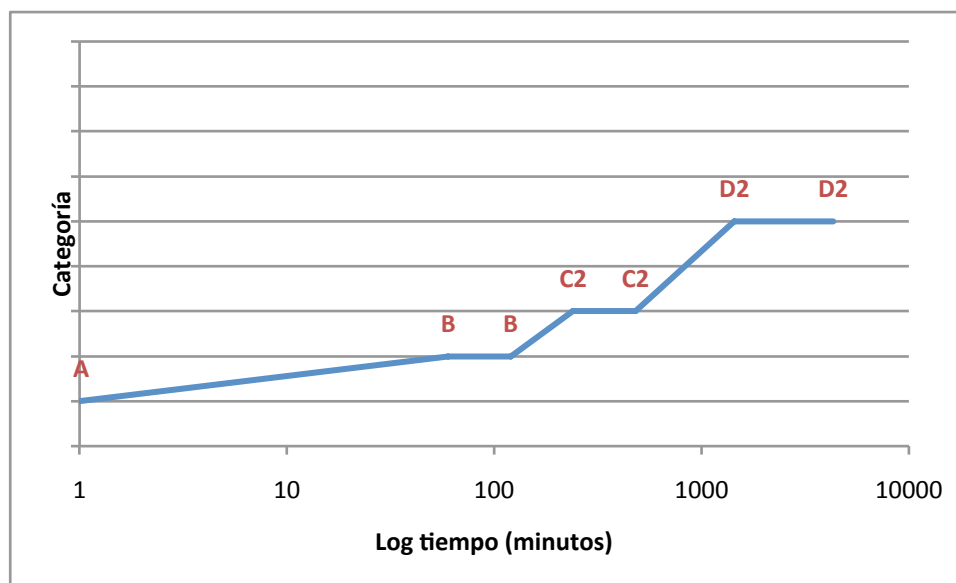


Figura 7.5.52. Representación gráfica de los resultados del ensayo Dusseault. DIT14-601.

Se observaron distintas clases de deterioro en las muestras. El efecto de la inmersión estática en los fragmentos de roca margosa de las facies Tap de la muestra es bastante considerable, produciendo fisuras longitudinales (Figura 7.5.53), desprendimientos (Figura 7.5.54) y estratificación acusada (Figura 7.5.55).

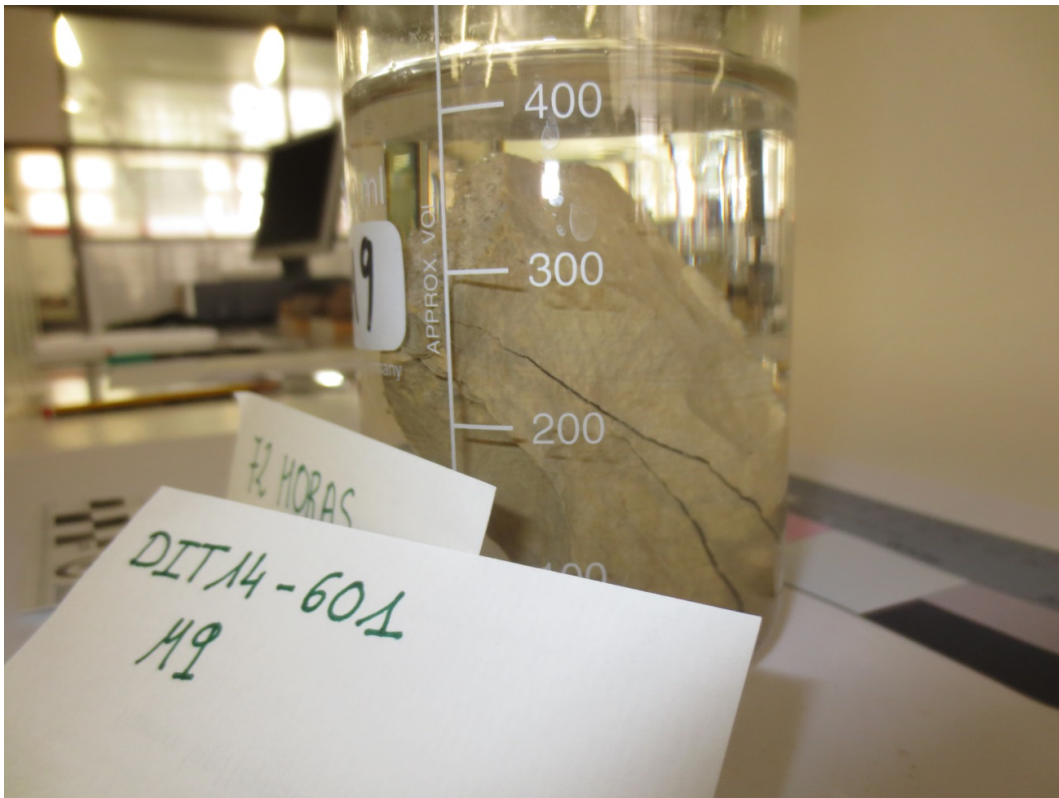


Figura 7.5.53. Fisuras longitudinales en el fragmento de roca M9. DIT14-601.

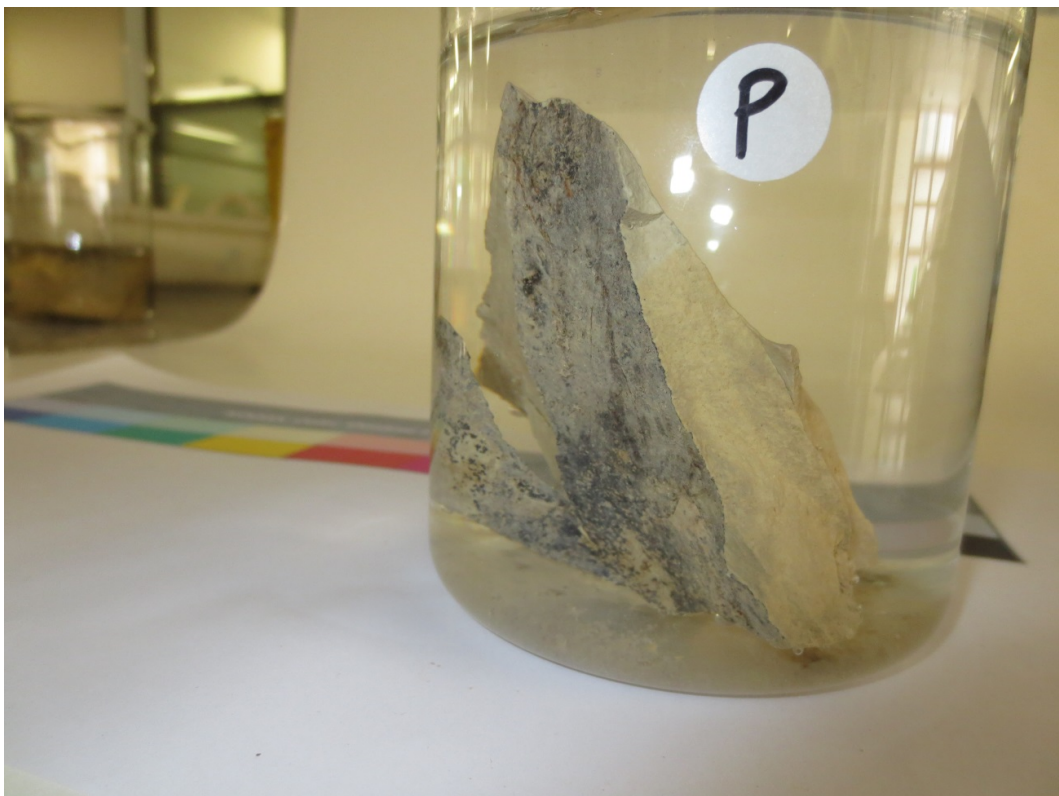


Figura 7.5.54. Desprendimiento y fracturación del fragmento de roca P. DIT14-601.

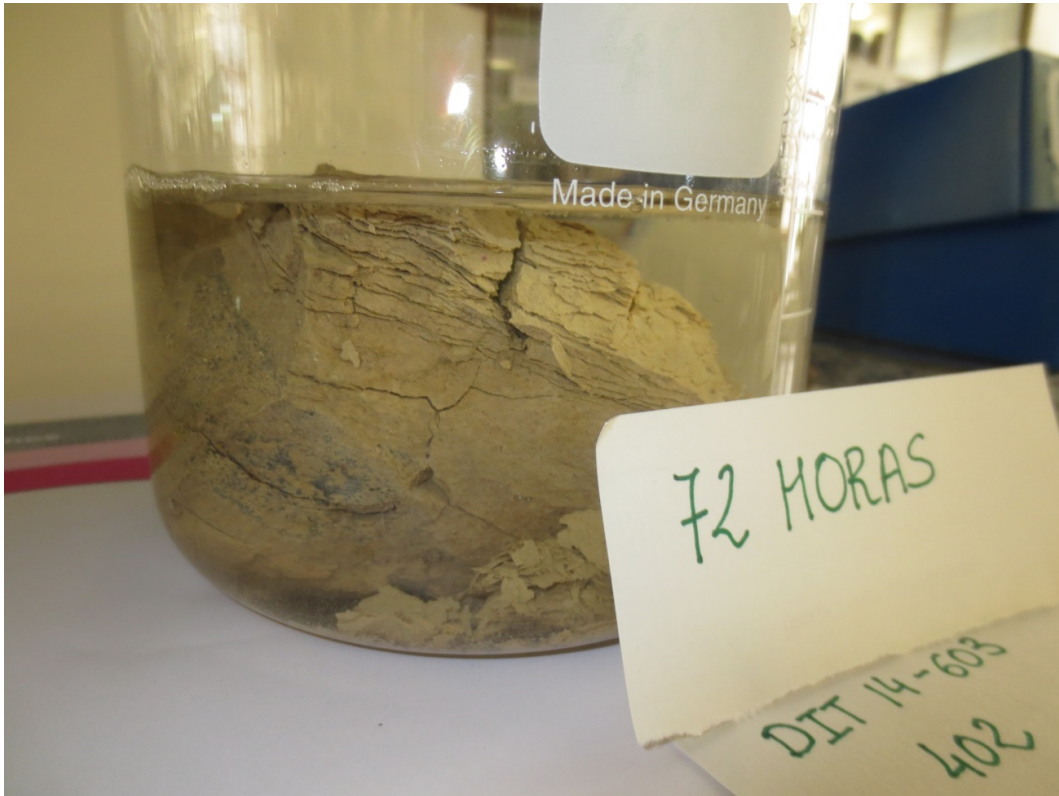


Figura 7.5.55. Estratificación acusada y pequeños desprendimientos en el fragmento de roca 402. DIT14-601.

Por último se extrajeron las muestras de los vasos de vidrio, se les retiró el agua superficial y se pesaron, mostrando los resultados en la Tabla 7.5.5.

Referencia	Masa inicial (g)	Masa final (g)		
		Fragmento madre	Fragmento desprendido	Total
<i>M9</i>	172.17	194.2	0	194.2
<i>P</i>	166.62	179.8	9.8	189.6
<i>402</i>	540.57	551.9	43.0	594.9

Tabla 7.5.5. Masas iniciales y finales de los fragmentos. DIT14-601.

7.6. ENSAYOS DE DISPERSABILIDAD

Los resultados medios del ensayo Pin-hole obtenidos en las muestras DIT14-601 son los siguientes (Tablas 7.6.1 y 7.6.2). En la Figura 7.6.1 se muestra el aspecto de una de las muestras ensayadas tras la finalización del ensayo.



Figura 7.6.1. Aspecto de una muestra ensayada tras la finalización del ensayo. DIT14-601.

PROPIEDADES ÍNDICE	MUESTRA DE ENSAYO (g)	MUESTRA ENSAYO + CONO (g)	MUESTRA MAT. SOBRANTE (g)
REFERENCIA MOLDE	--	--	J
TARA MOLDE CILINDRICO	46.45	46.45	59.39
TARA+ SUELO+ AGUA Inicial	102.68	103.69	84.26
TARA + SUELO + AGUA Final	--	107.46	--
TARA + SUELO	90.91	--	79.39
AGUA	11.77	--	4.87
SUELO	44.46	--	20
% HUMEDAD	26.47	--	24.35
DENSIDAD APAR. (KN/mm ³)	1.62	--	--
DENSIDAD SECA (KN/mm ³)	1.28	--	--

Tabla 7.6.1. Propiedades índice. DIT14-601.

Las observaciones del caudal siguiente se clasificaron con la letra E con respecto a la coloración del agua y al grado de turbidez, lo que significa que el agua del caudal saliente era totalmente clara, y con el número 5 con respecto al criterio de desprendimiento de partículas, dado que el caudal saliente no venía acompañado con partículas de suelo desprendidas. Se puede concluir que en este tipo de suelo los conductos que se originan debido al paso del agua a través de ellos se estabilizan, y por tanto en los taludes construidos sobre este material no se van a originar problemas de dispersabilidad.

Capítulo 7. Resultados obtenidos en Laboratorio

TIEMPO TRANSC. (min)	ESCALÓN DE CARGA (cm)	VOLUMEN LEC. PROBETA (cm ³)	INCREMENTO DE VOLUMEN (cm ³)	CAUDAL DESDE INICIO (cm ³ /s)	CAUDAL EN INTERVALOS (cm ³ /s)	COLORACIÓN DEL AGUA GRADO DE TURBIDEZ					DESPRENDIMIENTO DE PARTÍCULAS				
						A	B	C	D	E	1	2	3	4	5
2	5	76	76	0.63	0.63					X				X	
4		130	54	0.54	0.45					X					X
5		150	20	0.50	0.33					X					X
6		166	16	0.46	0.27					X					X
8		192	26	0.40	0.22					X					X
10		212	20	0.35	0.17					X					X
2	18	85	85	0.71	0.71					X					X
4		190	105	0.79	0.88					X					X
5		240	50	0.80	0.83					X					X
6		285	45	0.79	0.75					X					X
8		375	90	0.78	0.75					X					X
10		465	90	0.78	0.75					X					X
2	38	190	190	1.58	1.58					X					X
4		390	200	1.63	1.67					X					X
5		480	90	1.60	1.50					X					X
6		575	95	1.60	1.58					X					X
8		770	195	1.60	1.63					X					X
10		950	180	1.58	1.50					X					X
2	102	360	360	3.00	3.00					X				X	
4		700	340	2.92	2.83					X					X
5		870	170	2.90	2.83					X					X
6		1050	180	2.92	3.00					X					X
8		1420	370	2.96	3.08					X					X
10		1800	380	3.00	3.17					X					X

Tabla 7.6.2. Lectura y cálculos de ensayo. DIT14-601.

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

8.1 CLASIFICACIÓN VISUAL DE LOS DESMONTES EN FACIES TAP EN FUNCIÓN A SU COMPORTAMIENTO FRENTE AL DESMORONAMIENTO

Se ha llevado a cabo una clasificación de desmontes excavados en Facies Tap en función de la intensidad de los procesos de alteración y degradación de su superficie. El objetivo ha sido doble. En primer lugar, se trata de validar los índices de degradabilidad de las facies Tap obtenidos en el laboratorio con el comportamiento real de los taludes excavados. En segundo lugar, se pretende validar, para las facies Tap la clasificación textural de las rocas blandas y su potencialidad para predecir su degradabilidad y la erosionabilidad en los desmontes excavados, análogamente a las recomendaciones de Martínez-Bofill (2011) para rocas arcillosas.

La clasificación de los desmontes que aquí se presenta, es una clasificación visual de campo basada en la presencia de indicadores de erosión y desmoronamiento de la superficie excavada en los materiales de la facies Tap, en un extremo por calizas, más o menos margosas, que se mantienen casi intactas al cabo de los años, y en el extremo opuesto por arcillas y margas, fuertemente erosionables. El mayor interés de esta clasificación está en las formaciones intermedias tipo arcillas margosas, margas, y margas calcáreas cuyo potencial de degradación muestra una gran variabilidad. La clasificación se basa en la descripción cualitativa del estado de la superficie de los taludes que se ha procurado objetivar mediante un conjunto de indicadores.

Así, los desmontes se han agrupado en cinco categorías que se resumen a continuación:

- *Tipo 1:* Desmontes que permanecen prácticamente inalterados durante el periodo de vida útil de la infraestructura.
- *Tipo 2:* Desmontes que a largo plazo presentan un desmoronamiento esporádico de su superficie, con algunos pequeños fragmentos que se acumulan al pie de los mismos con escasa descomposición.
- *Tipo 3:* Desmontes degradables a medio plazo, con un grado de alteración moderado. Tendencia al retroceso y caídas frecuentes de bloques, aunque la roca no llega a descomponerse.
- *Tipo 4:* Desmontes con tendencia a presentar cárcavas, frecuentes caídas de bloques y deslizamientos superficiales. La roca se descompone en arcilla o limo.
- *Tipo 5:* Desmontes constituidos por arcillas y limos escasamente litificados. Acarcavamiento intenso de su superficie y formación de deslizamientos rotacionales.

Por ello, se ha confirmado que los criterios establecidos por Martínez-Bofill (2011) para rocas arcillosas son igualmente aplicables al caso de los materiales de la Facies Tap. Si bien, en nuestro caso, ha tenido que adaptarse en concreto a las litologías variablemente carbonatadas existentes en este tipo de materiales. En la Tabla 8.1.1 se muestran las características necesarias para clasificar los desmontes en el campo.

Descriptor	Aspecto superficial	Cárcavas	Roturas	Durabilidad de los bloques caídos	Litología frecuente	Ángulo talud natural
I	Roca sana	No	No	Intactos	Calizas	>60°
II	Roca sana a ligeramente meteorizada	No	Pequeñas cuñas	Alteración lenta (>2 años)	Calizas margosas	>40°
III	Roca meteorizada superficialmente	Incipientes	Cuñas medianas a grandes	Desmoronamiento moderado (1-2 años)	Margas	35-40°
IV	Roca muy alterada. Regolito en superficie	Desarrolladas	Caída masivas de bloques	Desmoronamiento rápido (<1 año)	Arcillas margosas	30-35°
V	No aflora roca	Omnipresentes	Deslizamientos profundos	No hay bloques	Arcillas	<30°

Tabla 8.1.1. Propuesta de clasificación de desmontes en Facies Tap en función de su degradación temporal.

8.2 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y COMPOSICIONAL DE LAS FACIES TAP

8.2.1 Generalidades

Dentro de los objetivos de la presente Tesis es determinar hasta qué punto la composición petrológica condiciona la durabilidad de los materiales de la Facies Tap. Por lo tanto, se ha considerado imprescindible la correcta identificación y caracterización de las rocas de las zonas de estudio.

Según Martínez-Bofill (2011) se consideran rocas blandas alterables los materiales pétreos de origen sedimentario con distinta composición mineral y grado de cementación, que han recibido distintas denominaciones como marga, lutita, arcillita, limolita, caliza margosa, marga arcillosa, pizarra, arcosa, entre otras.

Se ha realizado una revisión de los artículos publicados en las principales revistas de Geología e Ingeniería Geológica sobre las rocas blandas alterables (se muestra en el apartado 2.1). Tal como se ha discutido, las clasificaciones existentes más extendidas de las rocas sedimentarias se han desarrollado teniendo en cuenta un amplio rango de criterios tales como la composición mineralógica, textura, y otros atributos físicos, así como los ambientes en los que se han depositado, las relaciones genéticas y su importancia económica local. Es sabido que los sedimentos se convierten en rocas mediante procesos de compactación, cementación y, en ocasiones, de transformación mineralógica. En la naturaleza es frecuente encontrar una gradación entre ambos. En general, los sedimentos y las rocas sedimentarias detríticas se clasifican por separado. Además, los parámetros utilizados para clasificar los sedimentos sin litificar, suelen ser similares a los de las rocas equivalentes, para poder establecer analogías, siendo particularmente relevante el hecho que en ambos casos se omita sistemáticamente la presencia de minerales que actúan como elemento cementante de la roca (por ejemplo, carbonato cálcico, óxidos de hierro, entre otros). La transición suelo – roca no está pues bien establecida en la literatura, lo que constituye un grave inconveniente para el análisis del potencial de degradación y desmoronamiento en los desmontes. En Ingeniería Geológica, el comportamiento de los materiales es fundamental, y desde este criterio, una clasificación petrográfica para su uso en ingeniería debería incorporar la presencia del cemento, que permite el paso de sedimento a roca consolidada.

Por este motivo se ha confeccionado una clasificación *ad-hoc* de las rocas carbonatadas detríticas que se presenta en el presente apartado. El objetivo básico ha consistido en agrupar los sedimentos y rocas en una misma clasificación, tomando como base los componentes texturales de los mismos: esqueleto detrítico, matriz limo-arcillosa y cemento carbonatado.

El criterio de clasificación utilizado se basa fundamentalmente en las propuestas del USGS (2004) y de Martínez-Bofill (2011) para sedimentos clástico-terrágenos. Como se ha detallado en el apartado 2.1. el sistema USGS se basa a su vez en algunos sistemas de clasificación preexistentes, de uso común. Sin embargo, se ha creído conveniente introducir, siguiendo a Martínez-Bofill (2011), la presencia del cemento carbonatado, ya que la presencia de cemento es la principal diferencia entre un sedimento y una roca, y por tanto es importante para clasificar los materiales. Además hay que recordar que la presencia de cemento, modifica la composición química del sedimento original. Por ello consideramos que la presencia de cemento en una roca tendría que

estar contemplada en su clasificación, ya que su presencia representa un factor clave en la durabilidad de las rocas, como se ha visto en los apartados precedentes y se analiza posteriormente.

Por tanto proponemos una nueva clasificación operativa de las rocas detríticas carbonatadas que se presenta en la figura 8.2.1, y que es completamente aplicable a los materiales de la Facies Tap.

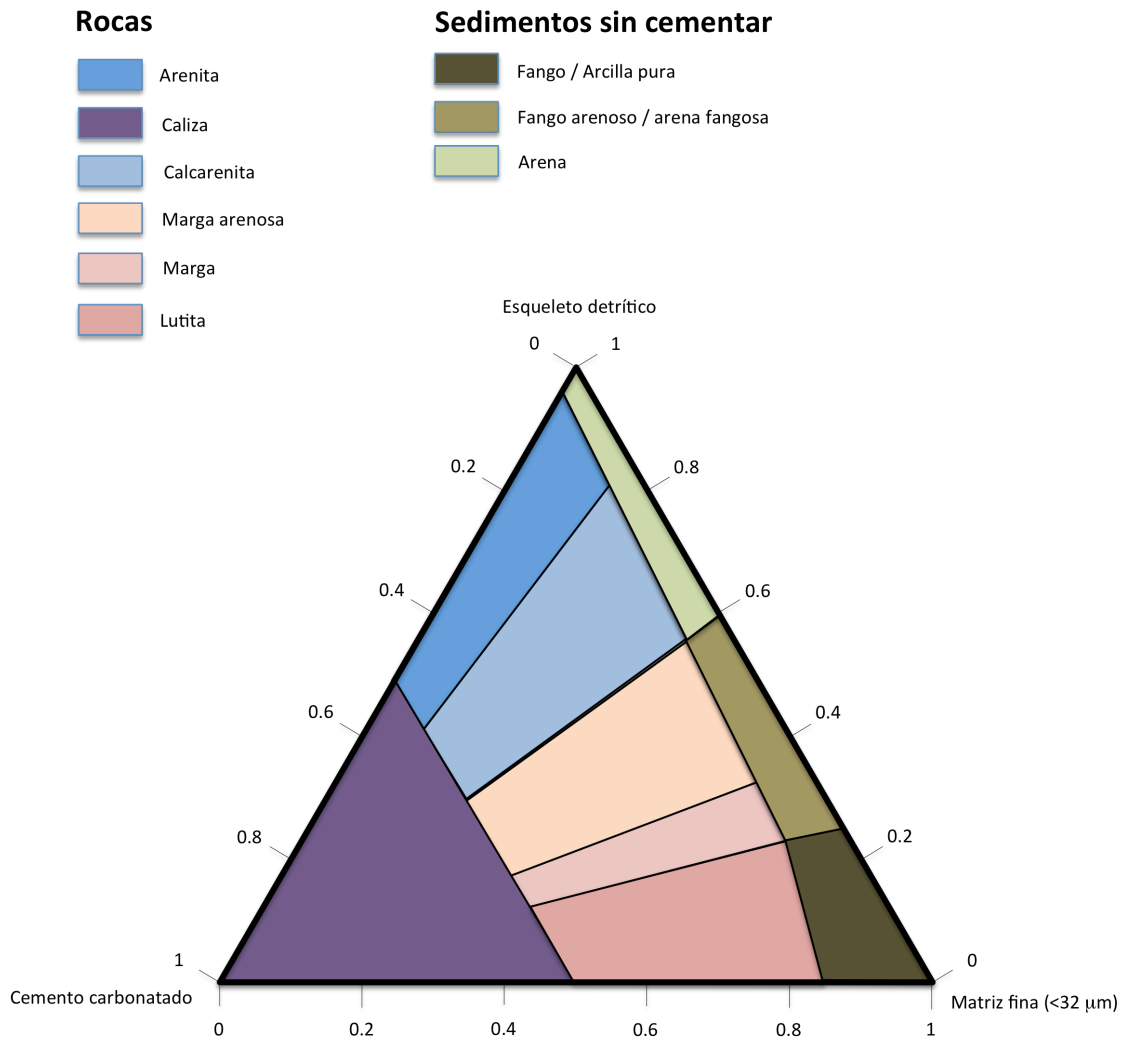


Figura 8.2.1. Clasificación propuesta para las rocas detrítico-carbonatadas, características de las Facies Tap.

La clasificación sintetizada en el diagrama triangular de la Figura 8.2.1, cuyos vértices lo constituyen el esqueleto detrítico (granular), la matriz limo-arcillosa y el cemento carbonatado (calcita), los tres componentes principales de una roca detrítico-carbonatada. Las divisiones definen los dominios de las distintas rocas y sedimentos. La clasificación propuesta establece un límite entre sedimento y roca basado en el grado de cementación: por debajo del límite de aproximadamente 4 a 15 % se distribuyen los sedimentos (arcilla, limo y arena) en el sentido geológico o suelos en el sentido geotécnico. La mezcla de limo y arcilla ha sido denominada fango con independencia de que fracción predomine. Se da la particularidad de que el límite

granulométrico entre fango y arena es posible establecerlo mediante el microscopio óptico, no siendo posible hacerlo entre limo y arcilla.

Por encima de aproximadamente el 50% de componente cemento carbonatado la roca pasa a denominarse caliza. Los contenidos comprendidos entre el 4-15% y el 50% de cemento e inferiores al 15% de matriz limo-arcillosa delimitan el dominio de las *arenitas*. El límite del 15% de matriz es el utilizado en las clasificaciones petrológicas más aceptadas (Dott, 1954; Folk 1964).

Los contenidos entre el 4-15% y el 50% de cemento y con una relación esqueleto-matriz fina inferior al 25% definen los límites de las *lutitas*, entendidas como rocas compuestas mayoritariamente por limo y arcilla. Las *margas* están delimitadas por un contenido entre el 4-15% y el 50% de cemento y entre el 25% y 60% de fracción detrítica (tamaño arena) o superior, siendo el resto considerado matriz limo-arcillosa. A su vez estas se dividen en:

- *Margas "arcillosas"*: Roca mixta con una relación entre esqueleto y matriz entre el 35 y 25%.
- *Margas arenosas*: son aquellas con una relación entre la fracción detrítica y la fracción limo-arcillosa, que se encuentra entre el 60 y 35%.

Las *calcarenitas*, por su parte, están delimitadas por un contenido entre el 4-15% y el 50% de cemento y entre el 60% y 85% de fracción detrítica (tamaño arena) o superior.

Los extremos *caliza*, *arenita* y *fango* no deben considerarse como rocas características de las Facies Tap pero sí como su frontera. No son rocas blandas alterables, al igual que tampoco las calcarenitas, no detectadas en el estudio realizado en dichos materiales.

La identificación y diferenciación entre los tipos de rocas detrítico-carbonatadas puede establecerse de manera razonable mediante el microscopio óptico o microscopía electrónica de barrido con EDS, combinado con la determinación calcimétrica (véase el capítulo 7).

La clasificación propuesta para los materiales de la Facies Tap sólo es posible establecerla en el laboratorio. En el terreno, con la ayuda exclusiva de la lupa no es posible establecer las relaciones composicionales de la Figura 8.2.1.

La clasificación de campo debería distinguir entre calizas, margas y lutitas. Estas últimas en sentido amplio e incluyendo el tamaño granulométrico correspondiente a los limos y arcillas.

8.2.2 Clasificación petrográfica-textural de las muestras estudiadas (Facies Tap)

Las muestras estudiadas se han clasificado petrográficamente, en función de su composición, de acuerdo con la clasificación propuesta para las Facies Tap (Figura 8.2.2).

Las muestras se clasifican en su gran mayoría dentro del grupo de las margas. Dentro de estas se clasifican dentro de los 2 subgrupos mencionados que son las margas "arcillosas", y las margas arenosas. En menor proporción encontramos muestras que se deberían clasificar como calizas debido a su contenido en carbonato cálcico superior al 50%; y además varias muestras corresponden a lutitas.

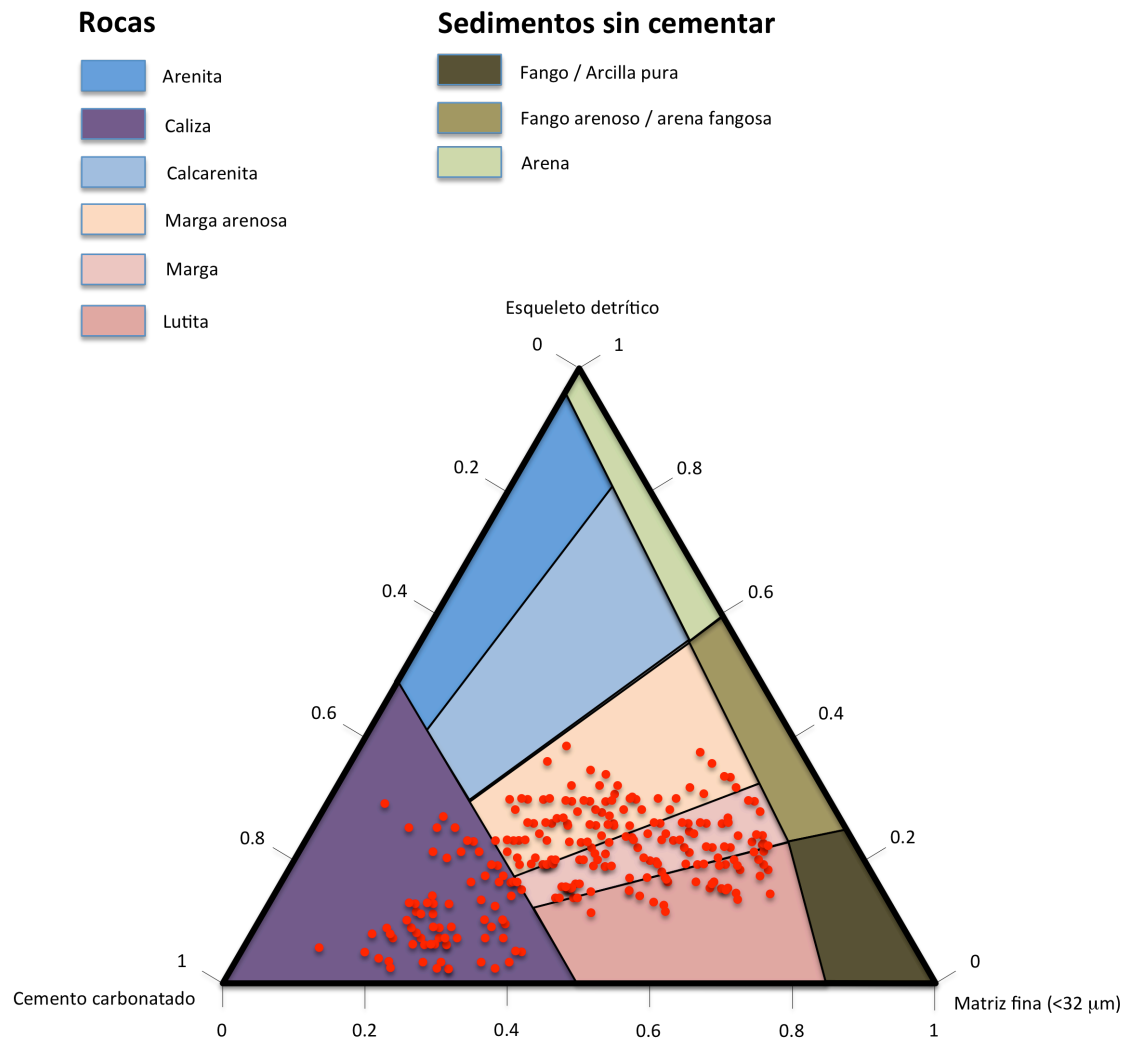


Figura 8.2.2. Clasificación de las muestras ensayadas correspondientes a las Facies Tap de acuerdo con la clasificación propuesta para las rocas detrítico-carbonatadas. Cada una de las muestras se muestra mediante un círculo rojo.

8.3 ANÁLISIS DE LA DURABILIDAD FRENTE A LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

8.3.1 Generalidades

En este apartado vamos a analizar la influencia de diversos factores en la durabilidad de los materiales estudiados, tomando como eje de referencia el ensayo de desmoronamiento de rocas blandas (SDT, *Slake Durability Test*).

Este ensayo es el test de referencia recomendado por la ISRM para la caracterización de la durabilidad de los materiales y, como se ha comentado en el capítulo 2, no existe un consenso claro en la utilización de este ensayo.

Uno de los factores claves a tener en cuenta en la realización del ensayo SDT es el número de ciclos de desgaste necesarios para caracterizar de la forma más adecuada la durabilidad de la muestra.

En la bibliografía, no existe actualmente un consenso sobre cuál debe ser el número de ciclos. Diversos autores como Franklin y Chandra (1972) y Koncagül y Santi (1999) utilizan el denominado índice Sehudes que corresponde al valor de desgaste obtenido después de 2 ciclos de durabilidad. Sin embargo, otros autores prefieren un mayor número de ciclos, realizando 3, 4 o 5 ciclos (Gokçeöğlü *et al.*, 2000; Dhakal, G. *et al.*, 2002; entre otros), realizan hasta 10 ciclos para caracterizar la durabilidad de una muestra.

Por ello y con el objetivo de determinar el número de ciclos necesarios para caracterizar la durabilidad de una muestra con mayor representatividad, se ha procedido a realizar, un análisis de los resultados obtenidos y compararlo con lo que dicen los diversos autores en la bibliografía.

Consideramos que los valores obtenidos en el primer ciclo de desgaste no son representativos de la durabilidad del material, ya que el primer ciclo se encuentra fuertemente influenciado por el proceso de extracción y preparación de la muestra. Así, los valores pueden estar falseados o influenciados por:

- La pérdida de pequeños fragmentos no representativos, debido a pequeñas fracturas generadas durante el propio proceso de manipulación y preparación de la muestra (serrado, tallado, refrentado...)
- El redondeo de las aristas angulosas y de los vértices del cubo, aristas en fragmentos irregulares...

Se interpreta pues, que el primer ciclo de ensayo sirve, fundamentalmente como preparación y puesta a punto de la muestra. Por tanto, los valores obtenidos en el primer ciclo de desgaste (*Id1*) deberían ser considerados como punto de partida inicial del SDT.

El valor obtenido en el segundo ciclo se considera representativo de la durabilidad, pero no permite estudiar cual será la tendencia al desmoronamiento de la muestra, ya que la única referencia es el valor del primer ciclo, el cual consideramos no representativo de las condiciones inalteradas de las muestras. De esta forma, consideramos que para una correcta caracterización de la durabilidad del material estudiado se deben realizar, como mínimo, 3 o más ciclos.

A mayor número de ciclos, tal y como manifiesta Martínez-Bofill (2011) se discrimina mejor el valor de durabilidad entre las distintas muestras. Para un bajo número de ciclos (2-3) podemos obtener resultados parecidos en muestras, que a medio-largo plazo, muestran un comportamiento diferente. La realización de 4 o más ciclos permite la progresiva discriminación de los valores de durabilidad con un mayor contraste entre muestras, hecho que permite analizar con mayor detalle su comportamiento a largo plazo

Por otra parte, y tal como ya se ha indicado en el apartado 7, las muestras con mayores índices de durabilidad presentan una tendencia lineal frente a los ciclos de desmoronamiento, que pasa de forma progresiva a una tendencia no-lineal a medida que disminuye la durabilidad de los materiales.

Por ello se puede considerar (Martínez-Bofill 2011) que la realización de al menos 4 ciclos de desgaste comporta las siguientes ventajas:

- Permite una mejor discriminación de la durabilidad de las muestras.
- Se obtienen datos suficientes para valorar el posible comportamiento lineal del desgaste de las muestras.

Así y, para tener en cuenta estos antecedentes, tal como se describe en el apartado 5, las muestras han sido sometidas a varios ciclos de durabilidad, variables entre 3 y 6. La descripción de las muestras y de los taludes correspondientes se ha presentado en los apartados 6 y 7.

8.2.3 Influencia del agua de ensayo

Para estudiar la influencia del tipo de agua utilizada en el ensayo sobre los resultados del *Slake Durability Test*, a continuación se comparan las gráficas (Figuras 8.3.1 a 8.3.5) de la evolución del Índice de desmoronamiento con el número de ciclos de muestras con la misma procedencia y las mismas condiciones de humedad al inicio (en el caso de las muestras DIT14-201 y DIT14-201) o el mismo tipo de material (marga calcárea o caliza margosa, en el caso de la muestra DIT14-1001).

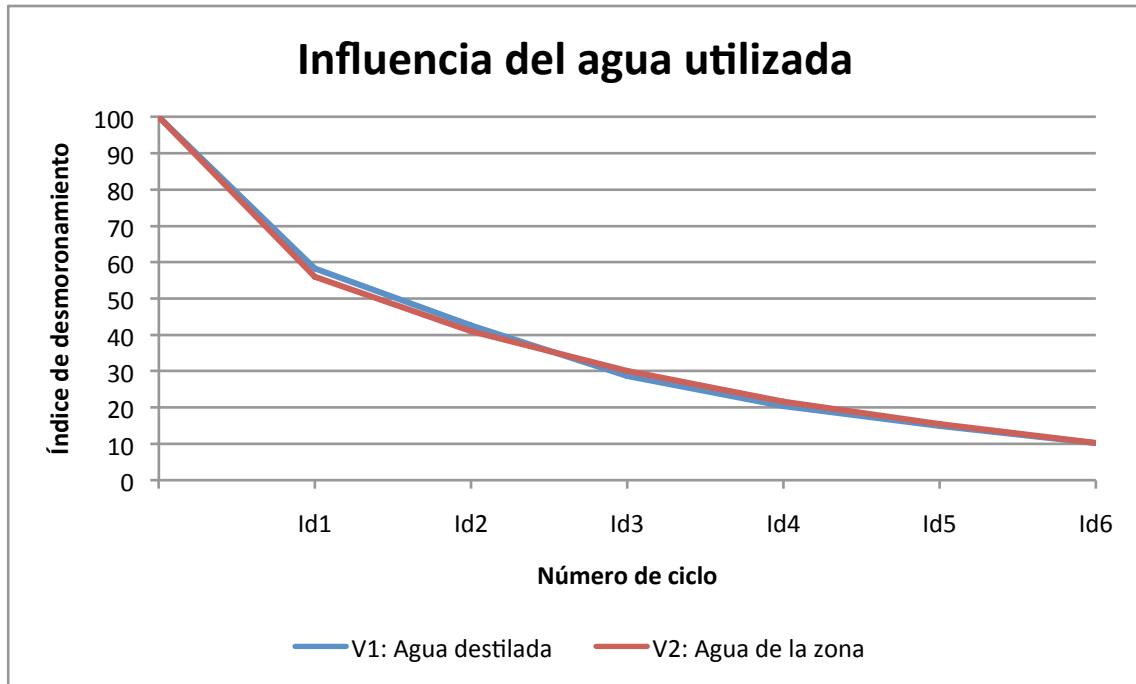


Figura 8.3.1. Comparativa entre las muestras húmedas procedentes de Alcoy.DIT14-201.

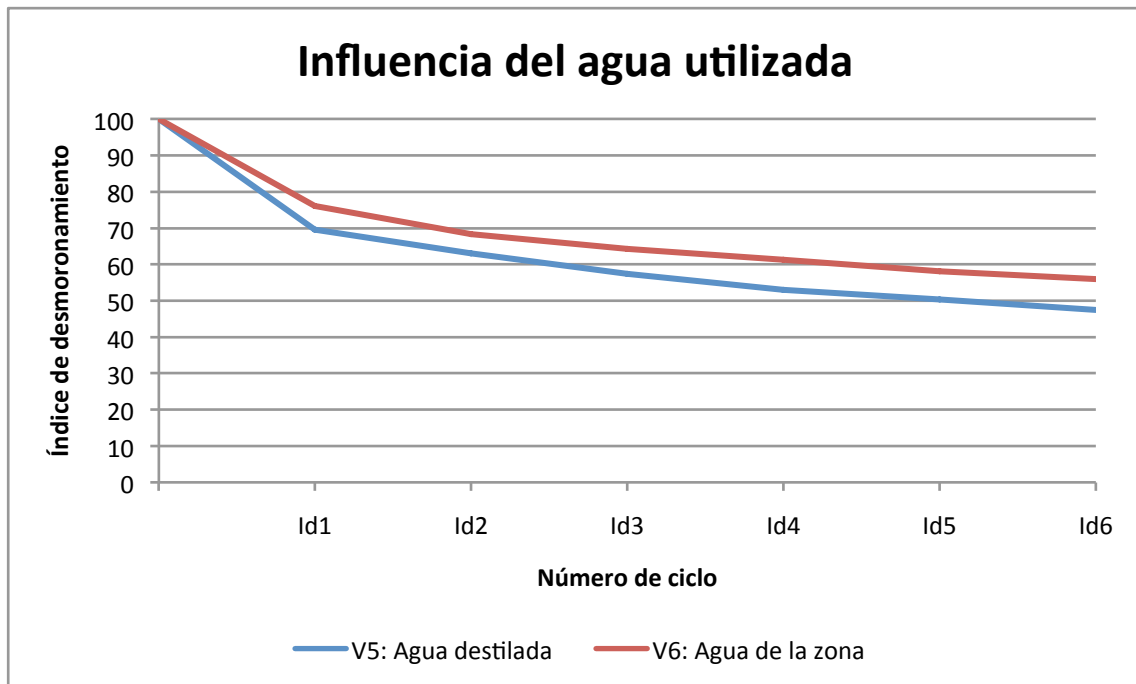


Figura 8.3.2. Comparativa entre las muestras húmedas procedentes de Montaberner. DIT14-601.

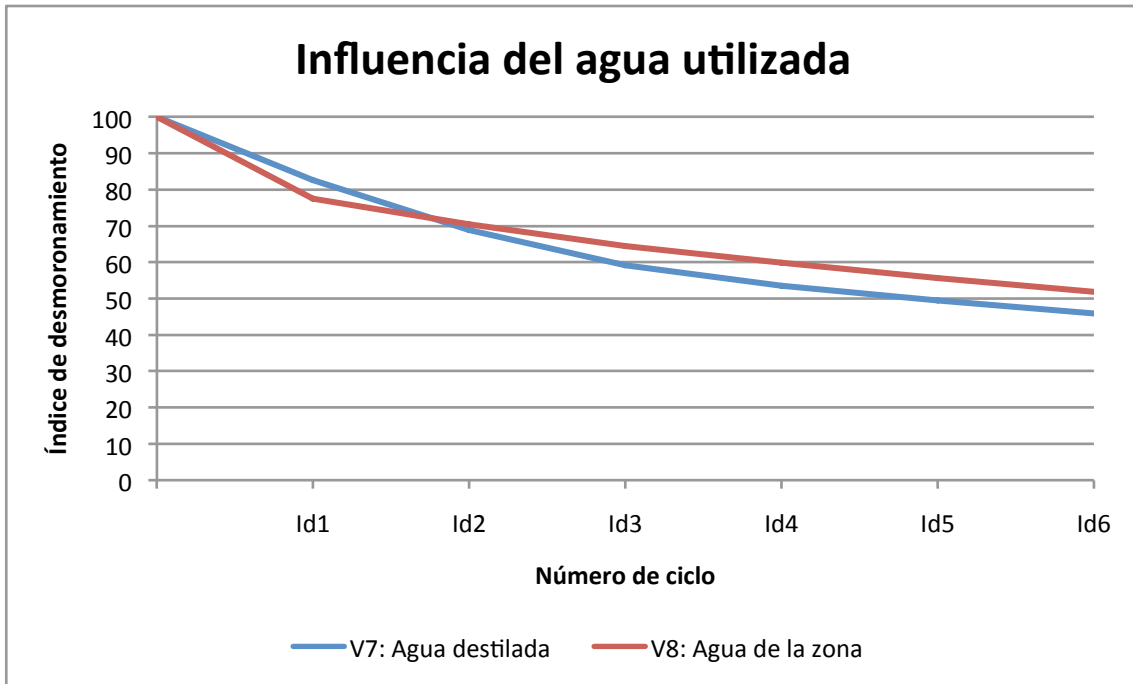


Figura 8.3.3. Comparativa entre las muestras secas procedentes de Montaberner. DIT14-601.

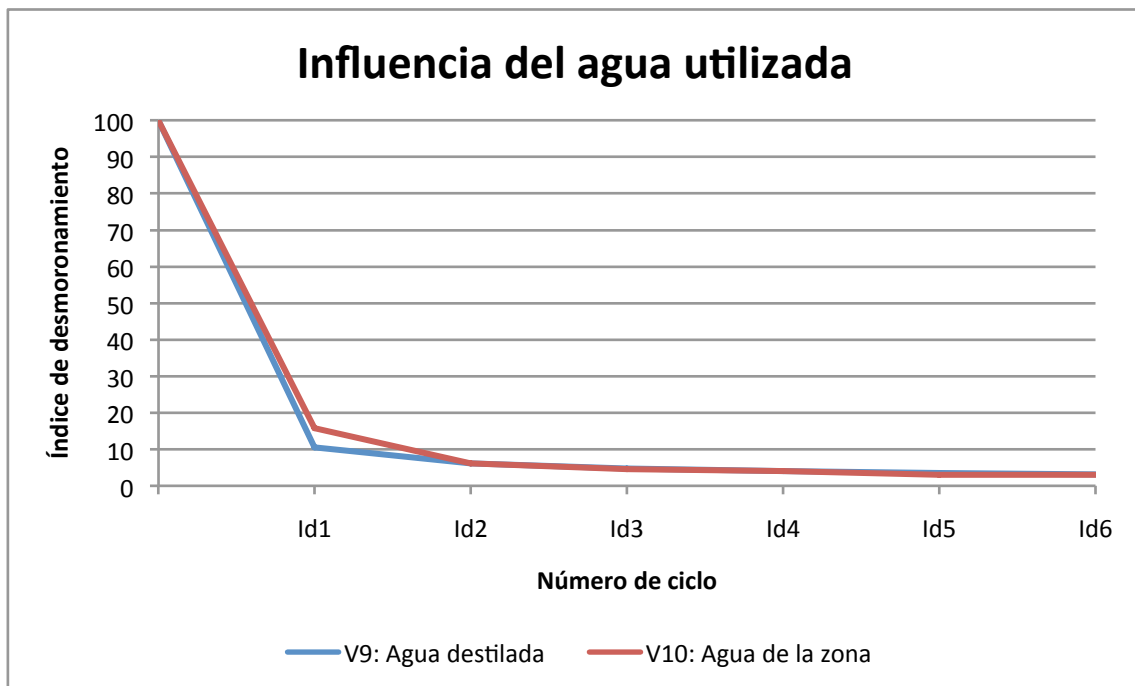


Figura 8.3.4. Comparativa entre las muestras de caliza margosa procedentes de Benisa. DIT14-1001.

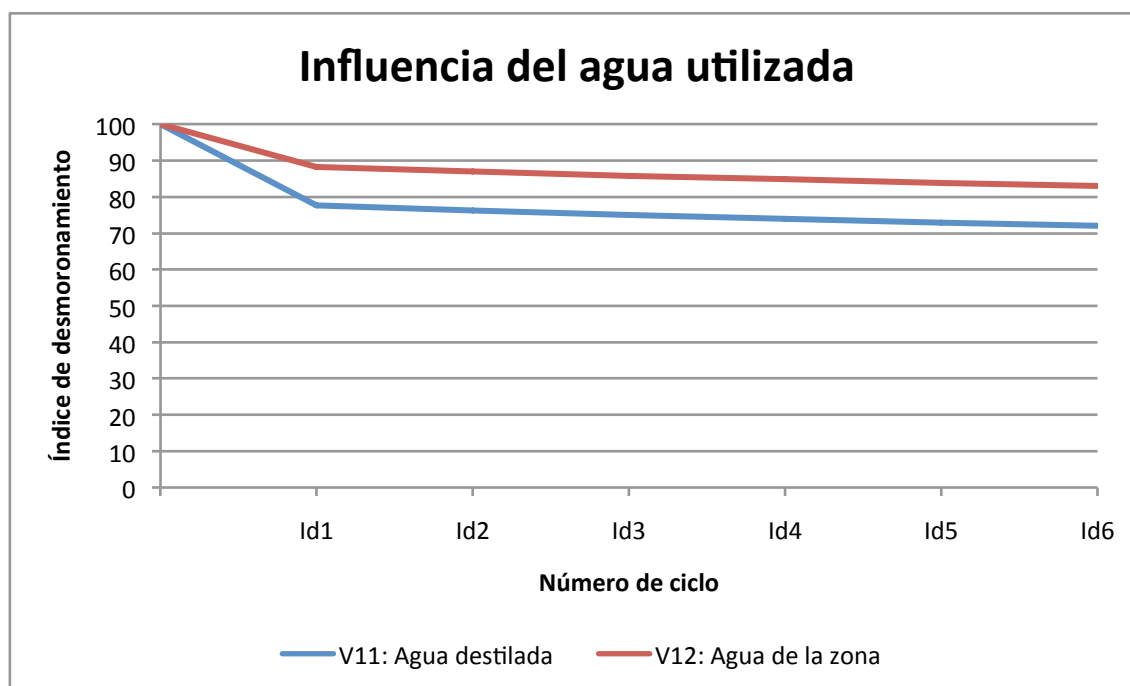


Figura 8.3.5. Comparativa entre las muestras de marga calcárea procedentes de Benisa. DIT14-1001.

A la vista de las anteriores gráficas parece confirmarse que los resultados obtenidos de manera estándar con dicho ensayo arrojan valores de durabilidad superiores a los reales, ya que cuando no se utiliza agua destilada sino que se utiliza agua natural de la zona se ve un incremento en el índice de desmoronamiento de dichos materiales.

Esto es bastante claro en todas las muestras analizadas, máxime si se comparan con los resultados obtenidos de los Proyectos Constructivos y la posterior evolución de dichos taludes, con la existencia de deslizamientos rotacionales (Figuras 8.3.6 y 8.3.7), típicos de desmontes clasificados en esta Tesis como Tipo V.

Además cabe comentar la posible influencia de otros pequeños factores, como la forma de los fragmentos de las muestras, y la existencia de anisotropías texturales en las muestras. En este sentido, los datos que se desprenden de este factor, hace que sea necesario analizar los materiales de la Facies Tap con el agua existente en la zona cuando se va a estudiar su degradabilidad temporal.



Figura 8.3.6. Vista frontal de un deslizamiento rotacional ocurrido en los desmontes en Facies Tap durante las obras de construcción de la Variante de Alcoy.



Figura 8.3.7. Vista superior de un deslizamiento rotacional ocurrido en los desmontes en Facies Tap durante las obras de construcción de la Variante de Alcoy.

8.3.3 Influencia de las condiciones iniciales de humedad

Para estudiar la influencia de las condiciones de humedad al inicio del ensayo (muestra seca o muestra con la humedad higroscópica) sobre los resultados del *Slake Durability Test*, a continuación se comparan las gráficas de la evolución del Índice de desmoronamiento con el número de ciclos de muestras con la misma procedencia y el mismo tipo de agua utilizado durante el ensayo (figuras 8.3.8 a 8.3.11).

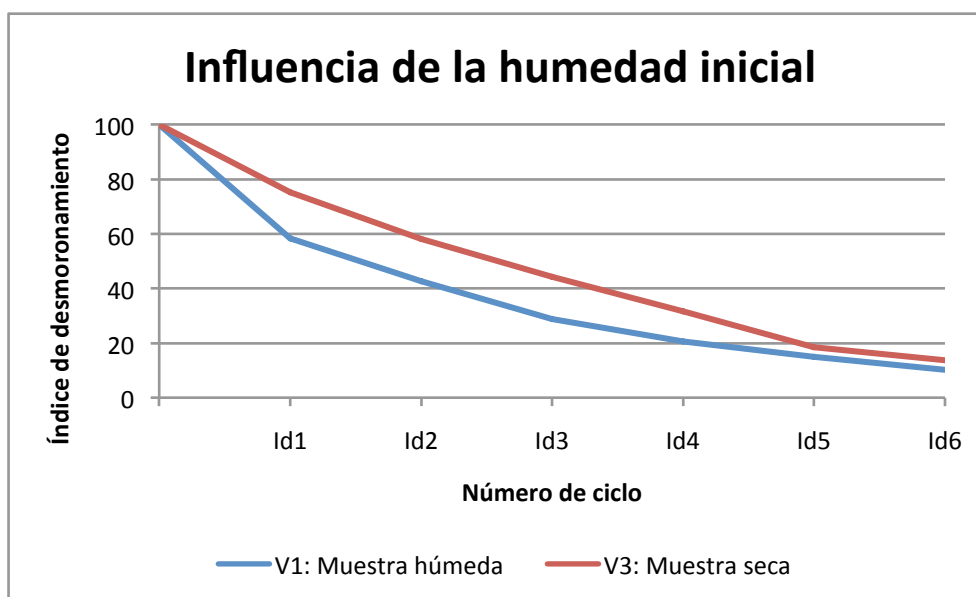


Figura 8.3.8. Comparativa entre los ensayos realizados con agua destilada de las muestras procedentes de Alcoy. DIT14-201.

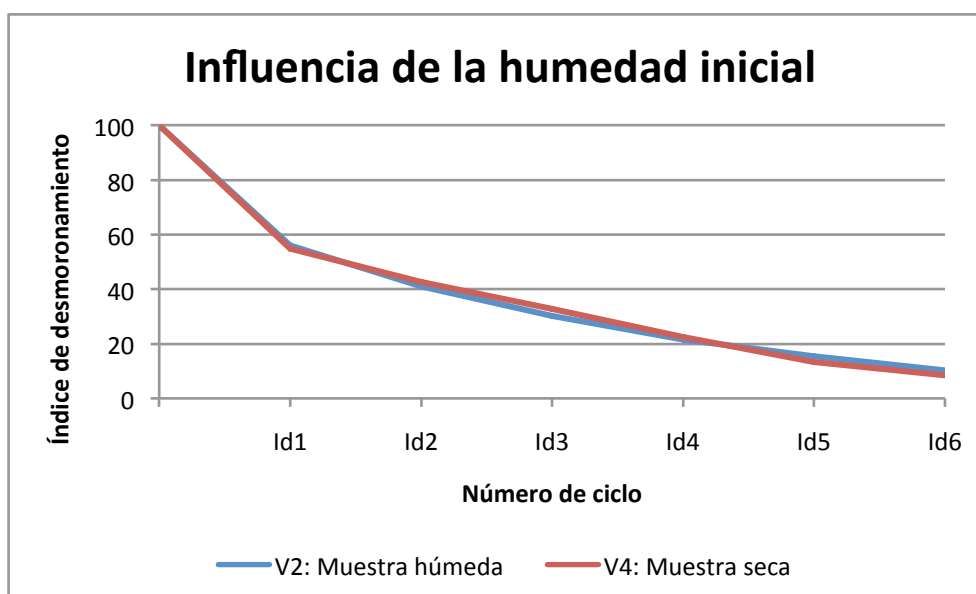


Figura 8.3.9. Comparativa entre los ensayos realizados con agua de la zona de las muestras procedentes de Alcoy. DIT14-201.

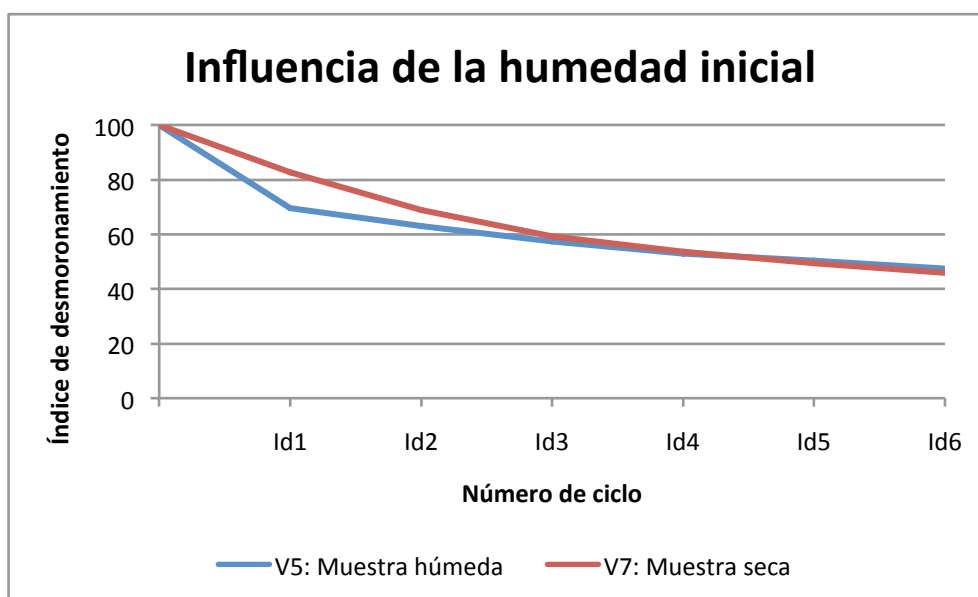


Figura 8.3.10. Comparativa entre los ensayos realizados con agua destilada de las muestras procedentes de Montabener. DIT14-601.

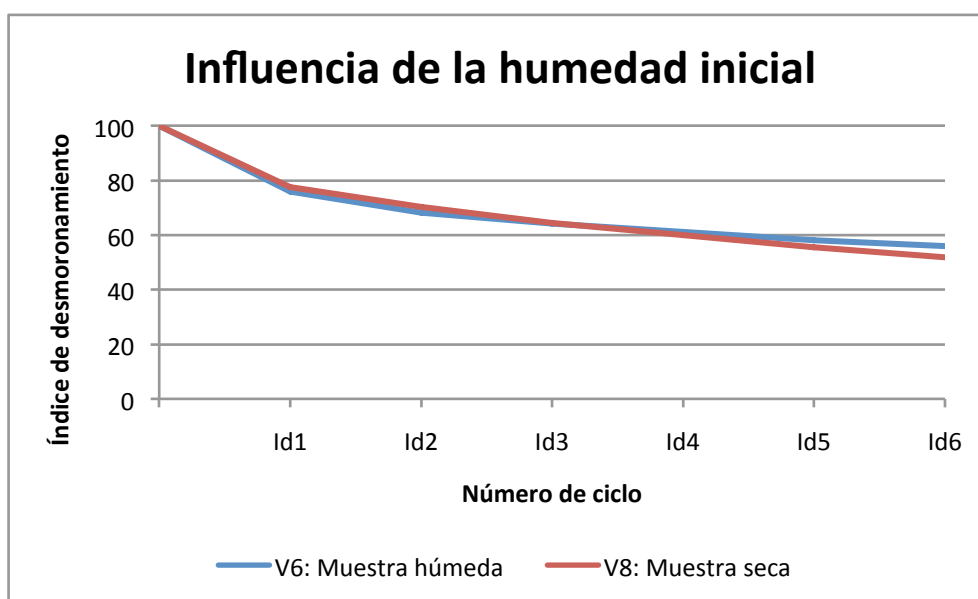


Figura 8.3.11. Comparativa entre los ensayos realizados con agua de la zona de muestras procedentes de Montabener. DIT14-601.

A la vista de las gráficas comparativas anteriores, resulta complicado valorar la influencia de las condiciones de humedad iniciales en los resultados del ensayo a nivel global.

Sin embargo, si se observa que cuando se trabaja con agua destilada tiene mayor importancia el contenido de humedad natural (Figuras 8.3.8 y 8.3.10), ya que se obtienen valores más altos del índice de desmoronamiento. Por ello, análogamente a lo recogido en el apartado anterior es

recomendable hacer los ensayos con agua de la zona a estudiar, hecho que queda patente al considerar que si se utiliza esta agua la importancia del estado inicial de humedad de las muestras a ensayar resulta irrelevante (Figuras 8.3.8 y 8.3.11).

8.3.4 Influencia de la litología

Para estudiar la existencia de posibles problemas derivados de la erosión diferencia en los materiales heterogéneos del Tap de Benisa (zona donde se encuentra más marcado este hecho), a continuación se comparan las gráficas de la evolución del Índice de desmoronamiento con el número de ciclos de muestras de este área de diferente composición y con el mismo tipo de agua utilizado durante el ensayo (Figuras 8.3.12 y 8.3.13).

En el resto de zonas estudiadas el comportamiento es similar pero consideramos más significativo estudiar la zona de Benisa porque las diferencias son muy acusadas.

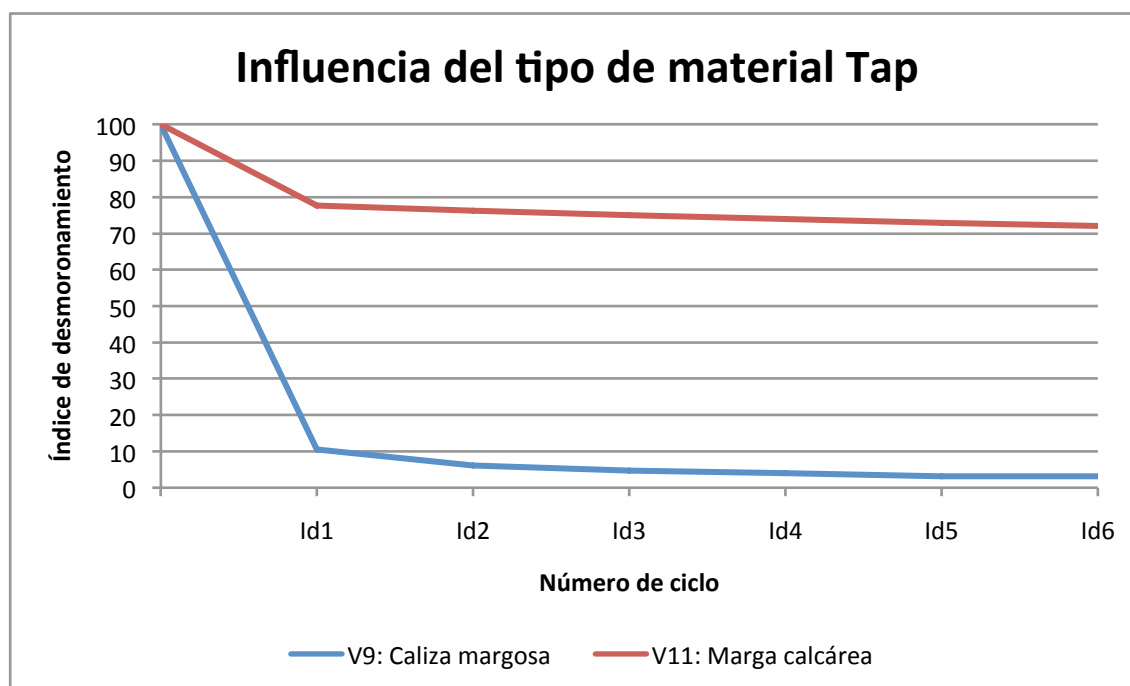


Figura 8.3.12. Comparativa entre los índices de desmoronamiento obtenidos utilizando agua destilada en el ensayo. DIT14-1001.

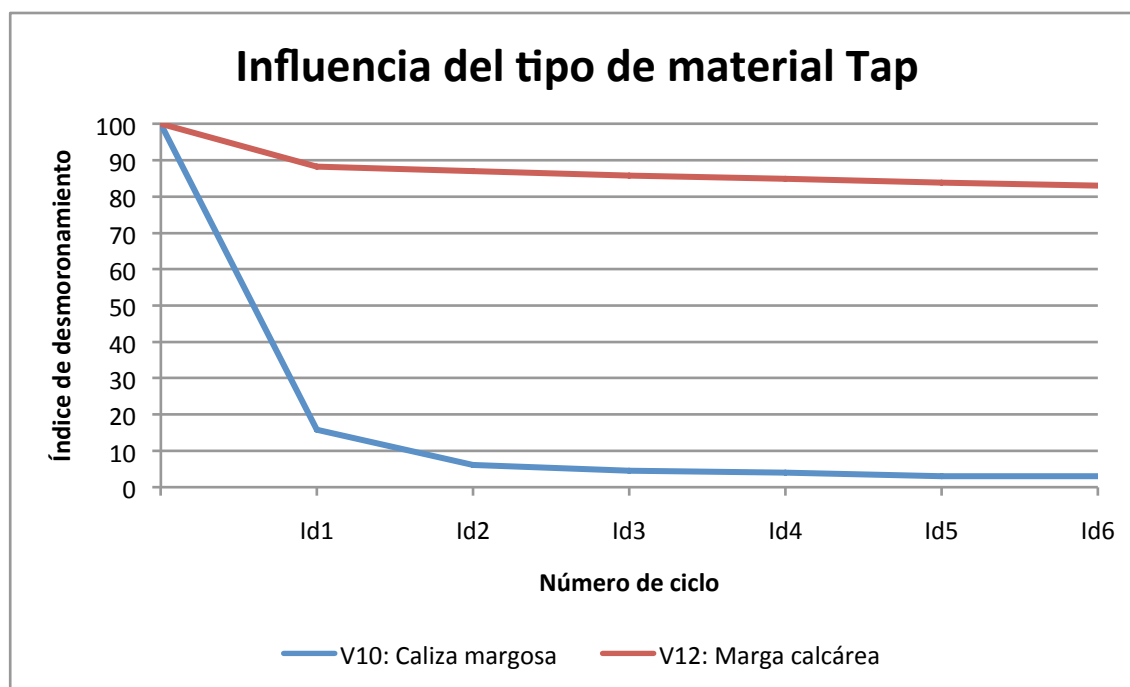


Figura 8.3.13. Comparativa entre los índices de desmoronamiento obtenidos utilizando agua de la zona en el ensayo. DIT14-1001.

A la vista de las gráficas anteriores, la respuesta al *Slake Durability Test* es muy distinta entre las muestras conformadas por calizas margosas muy carbonatadas y de baja densidad y las muestras conformadas por fragmentos de roca poco meteorizada de marga calcárea, lo que puede originar problemas de erosión diferencial en un talud que se construya sobre estos materiales.

En este sentido, los datos que se desprenden de este factor, hace que sea necesario analizar los materiales de la Facies teniendo precaución a la hora de tomar las muestras respecto a su ubicación futura dentro del desmonte, tomando tanto muestras alteradas como inalteradas y valorar su desmoronamiento por separado y conjuntamente. Del mismo modo, hay que analizar las distintas litologías presentes, haciendo un buen estudio litoestratigráfico para poder detectar con anterioridad a la ejecución del desmonte los posibles problemas de erosión diferencial que se puedan presentar.

8.3.5 Recomendaciones de utilización del *Slake Durability Test* en materiales de Facies Tap

En conclusión, a partir de los análisis realizados se puede considerar que estadísticamente, análogamente a lo sugerido por Martínez-Bofill (2011), la mejor opción para caracterizar correctamente la durabilidad de los materiales de la Facies Tap se obtiene con la realización de seis (6) ciclos de SDT. De esta forma, con este número de ciclos podemos discriminar cualquier comportamiento de material, y optimizar el tiempo de realización del ensayo.

La realización de seis (6) ciclos de desgaste comporta las siguientes ventajas:

Capítulo 8. Análisis y discusión

- Permite una mejor discriminación de la durabilidad de muestras con un comportamiento inicialmente similar.
- Se obtienen datos suficientes para valorar el posible comportamiento lineal del desgaste de las muestras.
- La realización de menos de cinco (5) ciclos de durabilidad puede dar lugar a errores en la interpretación de la durabilidad de los materiales.

Cada ciclo de desgaste implica una preparación y tiempo de ensayo total de 45-60 minutos, y un tiempo de secado en estufa de unas 6 horas, por lo que lo habitual es realizar 2 ciclos al día en el mejor de los casos. La realización de más de 6 ciclos supone en la práctica un incremento de tiempo de ensayo de 1 día, así como un aumento del coste, que sin embargo no va acompañado de un aumento significativo de la información sobre el comportamiento de los materiales.

Por tanto, a tenor de los resultados obtenidos en este estudio, se concluye que la mejor caracterización se realiza con seis (6) ciclos de ensayo SDT. En cualquier caso, antes de proceder al estudio de las muestras, se debe adoptar un criterio único de trabajo que permita comparar la durabilidad entre ellas.

8.4 PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN DESMONTES EJECUTADOS EN FACIES TAP MEDIANTE EL SDT

8.4.1 Análisis de resultados del SDT respecto a la categoría de desmonte

Se han enfrentado los resultados obtenidos después de ensayar las muestras en con el *Slake Durability Test*, con la clasificación de los desmontes frente al desmoronamiento y la erosión superficial presentada en el capítulo 8.1.

Se observa que la durabilidad de las muestras, expresada por el índice SDT, tiende a evolucionar de forma coherente con la tipología del desmonte definida en campo, tal como se muestra en la Figura 8.4.1. Se constata, sin embargo una importante dispersión de resultados a medida que aumenta el grado de degradabilidad en los desmontes.

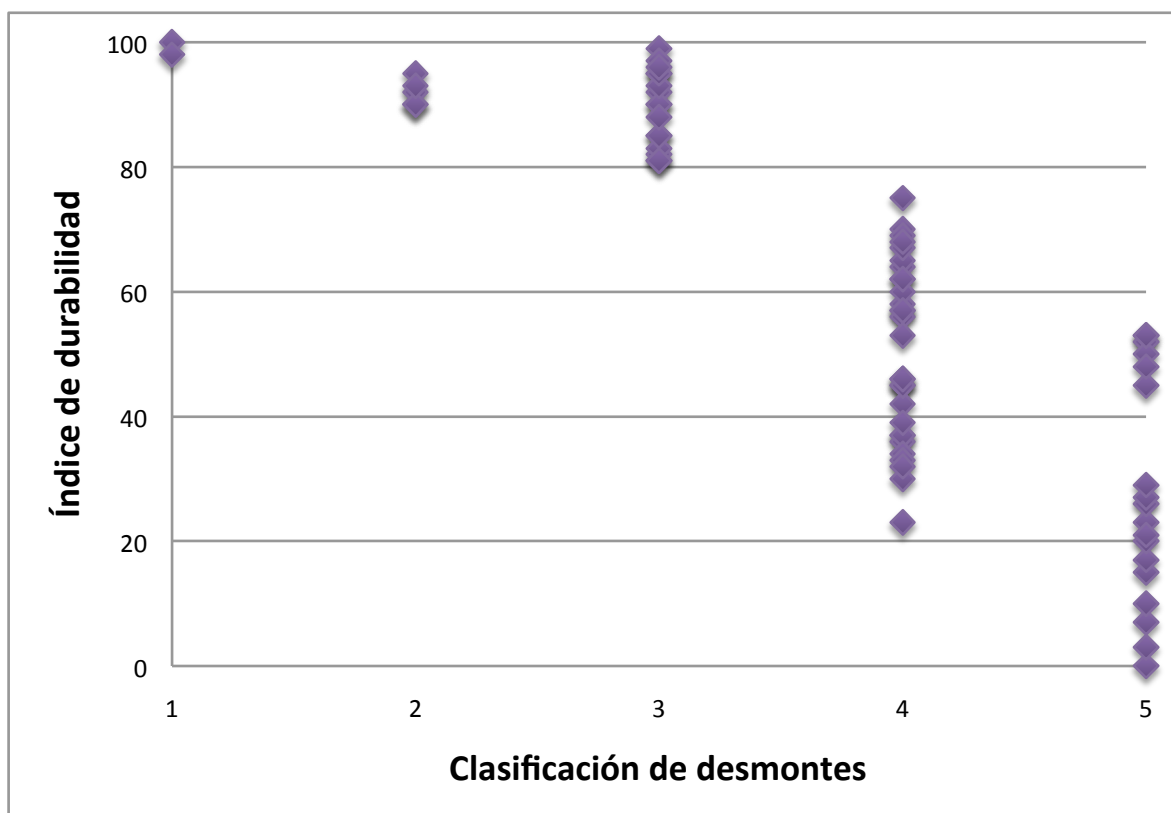


Figura 8.4.1. Comparación entre el índice de durabilidad respecto a la clasificación de campo de los desmontes, considerando 6 ciclos de ensayo.

También se ha podido observar que a mayor número de ciclos de ensayo SDT, se obtiene una mejor separación entre los distintos tipos de desmontes y por tanto una mejor predicción del comportamiento del talud, siendo pues la mejor referencia el índice correspondiente al sexto ciclo *Id6*, que es el reflejado en la Figura 8.4.1.

La envolvente inferior de los resultados para el sexto ciclo de ensayo *Id6*, muestra claramente la tendencia a la degradabilidad de los distintos tipos de taludes de acuerdo con su clasificación de

campo. A pesar de ello, la gran dispersión de resultados, con solapes en la envolvente superior, limita parcialmente su capacidad predicativa.

En la Figura 8.4.1 así como en la tabla 8.4.1 se observa que desmontes con escasa degradación de la superficie (tipo 1 y 2) se corresponden con muestras con Id6 elevados, que se encuentran entre 98 y 90. Sin embargo, esta relación no es biunívoca, lo que impide el uso del SDT de muestras intactas para predecir el comportamiento de los desmontes. Las muestras ensayadas de los desmontes con superficies muy degradadas (tipo 4), presentan una dispersión de resultados, con valores del SDT por encima de 70 y valores por debajo de los 40, e incluso 23. Asimismo, se puede observar que en la misma figura que, muestras con SDT comprendidos entre 80 y 100 se asocian a desmontes del tipo 1, 2 y 3, y que índices inferiores a 50 pertenecen a desmontes del tipo 4 y 5.

Categoría de desmonte	Id2 medio	Id2 máximo	Id2 mínimo	Id6 medio	Id6 máximo	Id6 mínimo
I	99,5	100	99,1	98,1	100	98,2
II	99,2	99,8	96,1	93,5	95,3	91,1
III	97,8	99,7	91,2	96,5	99,2	81,4
IV	94,6	98,6	76,1	52,3	77,1	23,2
V	57,8	72,4	15,3	20,3	54,9	0,0

Tabla 8.4.1. Resultados de durabilidad obtenidos con el SDT para el segundo y sexto ciclo de durabilidad, respecto a cada categoría de desmonte.

8.4.2 Valoración del SDT como predictor del comportamiento de los desmontes

Se ha realizado un análisis de la capacidad predictiva del comportamiento de los desmontes en materiales de la Facies Tap mediante el uso del SDT.

Categoría de desmonte	Tamaño de la muestra	Id6 máximo	Id6 mínimo	Promedio	Desviación estandar	Intervalo de confianza 95%
I	2	100	98,2	98,1	1,9	0,0
II	5	95,3	91,1	93,5	2,4	1,4
III	16	99,2	81,4	96,5	4,3	1,6
IV	29	77,1	23,2	52,3	8,2	5,3
V	18	54,9	0,0	20,3	6,5	0,0

Tabla 8.4.2. Análisis estadístico de los valores de durabilidad obtenidos con el SDT para el sexto ciclo de durabilidad, respecto a cada categoría de desmonte.

Para ello, a partir de los valores de durabilidad obtenidos en el sexto ciclo de durabilidad (Id6) en SDT, se ha obtenido un valor promedio o media de durabilidad para cada categoría de talud. Se ha

calculado la desviación estándar de dichos valores, y el rango de valores obtenidos para un intervalo de confianza del 95 %, de acuerdo con una distribución de resultados de tipo normal. Estos resultados se muestran en la tabla 8.4.2.

Así, y a partir de los datos presentados y discutidos anteriormente, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se observa una tendencia a la disminución de la durabilidad de las muestras de acuerdo con las categorías de desmonte descritas.
- Los valores de durabilidad SDT presentan cierto solape entre las distintas categorías de desmonte, pero permiten una eficaz discriminación entre ellas. Se concluye que el índice de durabilidad obtenido a partir del SDT permite predecir la degradabilidad y desmoronamiento de los desmontes a medio y largo plazo.
- El tipo de ensayos de durabilidad realizados permiten diferenciar entre las categorías de desmontes de tipo 3, de degradabilidad media y desmontes de tipo 4, de degradabilidad media-alta.
- Los resultados muestran que el uso del SDT y del *Id6* puede predecir el comportamiento de los desmontes con el paso del tiempo.
- Para mejorar la capacidad predictiva del SDT, y acotar la durabilidad de los desmontes a excavar en materiales de la Facies Tap, se recomienda utilizar (6) ciclos de ensayo.

8.5 RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS, MINERALÓGICAS Y TEXTURALES Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS DESMONTES

8.5.1 Introducción

Se han valorado las características mineralógicas, petrográficas y texturales con los valores de durabilidad obtenidos en los ensayos SDT. De esta forma, se pretende poner de manifiesto los posibles factores o componentes mineralógicos o petrográficos que condicionan la durabilidad de las muestras estudiadas.

8.5.2 La importancia del contenido en carbonato

Los análisis petrográficos muestran que algunas muestras presentan una proporción variable de calcita de origen detrítico, que no puede ser computada como cemento. Esta calcita detrítica ha sido cuantificada mediante la realización de contajes modales y parece tener importancia en el comportamiento de las muestras.

Por su parte, la combinación del análisis mediante el calcímetro de Bernard y los conteos modales han permitido conocer la proporción de cemento carbonatado presente en la muestra, tal como se ha descrito en el capítulo 5 de metodología.

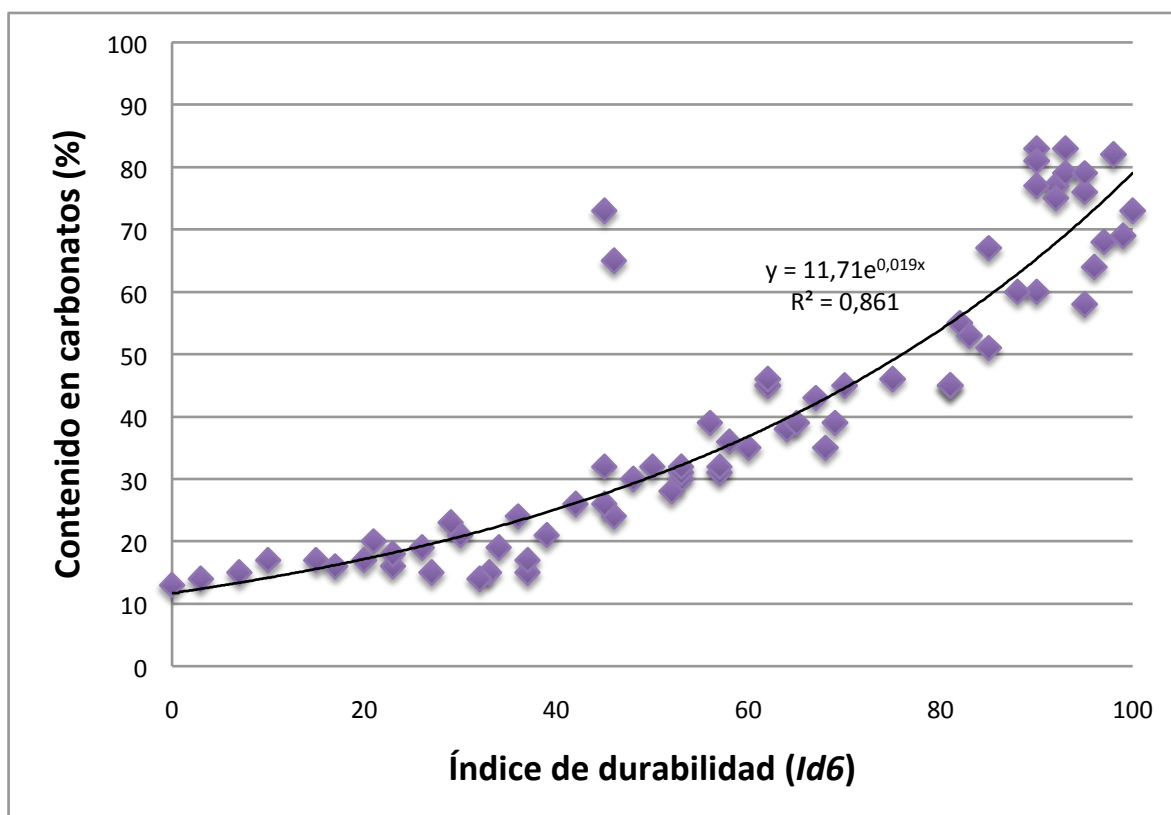


Figura 8.5.1. Relación del contenido en carbonato obtenido mediante calcimetría y el índice de durabilidad del sexto ciclo de SDT (Id6).

El contenido en carbonato cálcico es variable, oscilando entre el 13% y 86% y muestra una relación relación aceptable con la durabilidad ($R^2=0,86$; Figura 8.5.1) y, por tanto, con la clasificación de desmontes propuesta.

En dicha figura puede observarse que existen dos valores anómalos, con valores de durabilidad bajos a medios ($Id6$ de 45 y 46) y altos contenidos en carbonato (65 y 73%), lo que puede explicarse por la existencia dentro de ese porcentaje de calcita detrítica que no se presenta como cemento carbonatado

Análogamente puede explicarse para las muestras con alto índice de durabilidad ($Id6>85$) que presentan valores de carbonato más altos de lo esperado. Esto vendría a confirmar la importancia que tiene el factor cementante en estas rocas blandas y que marca su comportamiento degradacional con el tiempo.

8.5.3 La importancia de la porosidad

Como es bien conocido, la porosidad de un material permite la circulación de agua en su interior, lo que facilita la acción de los agentes meteóricos, de tal modo que en este estudio se ha llevado a cabo ensayos de Laboratorio para conocer este parámetro.

Sin embargo, al contrastar los valores de prosidad con los valores de durabilidad de las muestras estudiadas, no se observa ningún tipo de relación directa entre estos dos parámetros ($R^2=0,01$; Figura 8.5.2).

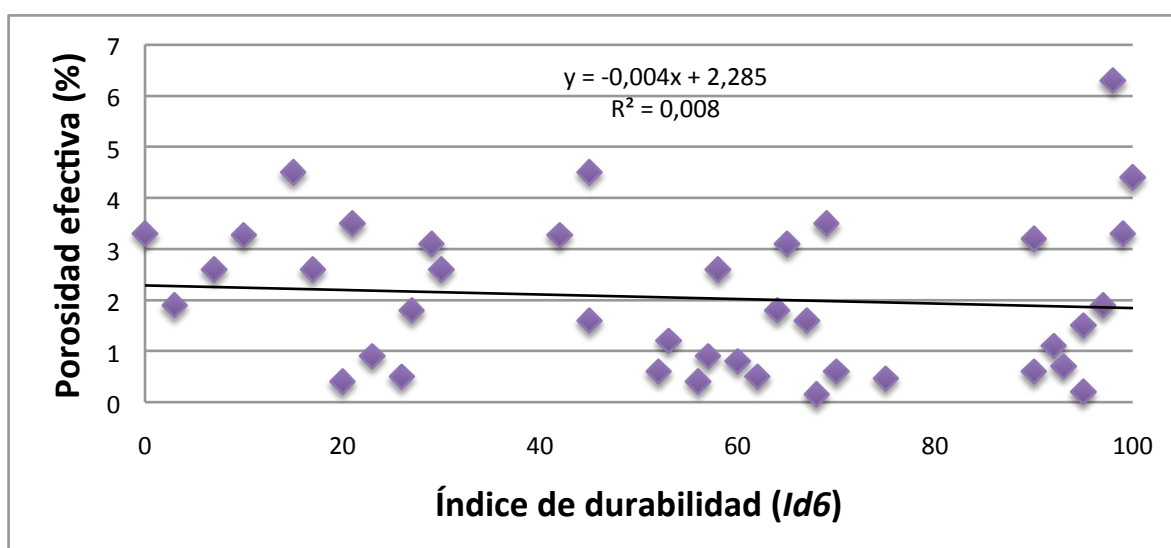


Figura 8.5.2. Relación entre la porosidad efectiva y el índice de durabilidad del sexto ciclo de SDT ($Id6$).

8.5.4 La importancia de la textura y petrografía

Las muestras estudiadas correspondientes a las Facies Tap de la Comunidad Valenciana, a pesar de su apariencia arcillosa, son según la clasificación petrográfica materiales detríticos-carbonatados, con proporciones variables de esqueleto granular, matriz y cemento y que corresponden a calizas, lutitas, margas y margas arenosas, respectivamente. Los dos últimos son los más abundantes, representando más del 60% de los materiales aflorantes en los desmontes (véase capítulo 8.2).

La clasificación de campo propuesta para los desmontes en Facies Tap se ha mostrado en el capítulo 8.1 y a partir de los mismos podemos decir que los taludes estudiados se clasifican principalmente dentro del tipo IV y V, y también del tipo III, junto con algún talud de tipo II.

Con el objetivo de contrastar todos estos aspectos, en la Figura 8.5.3 se ha dispuesto la categoría del desmonte con la clasificación petrográfica y textural de las muestras estudiadas.

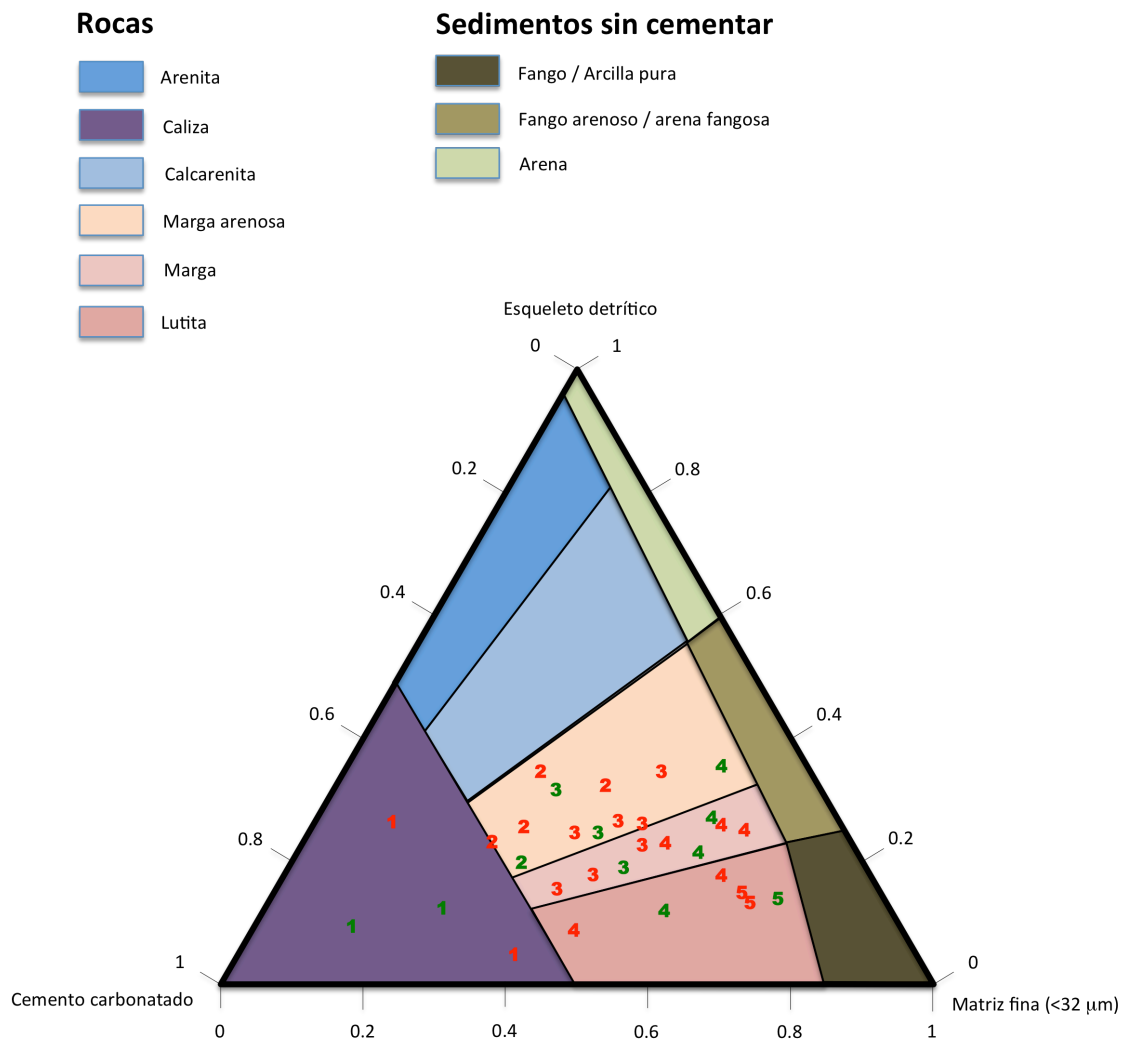


Figura 8.5.3. Clasificación propuesta para las rocas detrítico-carbonatadas de las Facies Tap, donde se han dispuesto cada uno de los taludes estudiados según la clasificación reflejada en esta Tesis. Los taludes con materiales de textura homogénea se representan números verdes y los que presentan materiales con textura heterogénea en rojo.

Así, en la figura anterior no se ha podido observar un comportamiento diferenciado entre los desmontes que presentan materiales con textura homogénea de los que la presentan heterogénea. Por tanto, se constata que para una misma composición litológica global de la roca, el comportamiento no varía en función de la textura. De todos modos, como propone Martínez-Bofill (2011), un buen conocimiento de la geología regional, y de las condiciones y ambientes de depósito de las secuencias sedimentarias pueden llegar a aportar información importante en cuanto a la degradabilidad de los desmontes a medio y largo plazo, ya que nos va a permitir conocer los posibles planos de debilidad de dichos materiales por lo que se puede favorecer la alteración y degradación de los mismos.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El objetivo global de la presente tesis es la caracterización de las rocas blandas, evolutivas y arcillosas, que constituyen las facies Tap del sur de la provincia de Valencia y de la mitad septentrional de la provincia de Alicante, tomando como punto de partida criterios de campo y ensayos habituales de laboratorio, que permitan predecir cuál será el comportamiento de los desmontes que se construyan en este material a medio y largo plazo.

De tal modo que las conclusiones más relevantes de esta Tesis se marcan a continuación:

- Se ha utilizado el ensayo de Laboratorio denominado *Slake Durability Test (SDT)* para la caracterización de la durabilidad de los materiales. Este ensayo es el recomendado por la ISRM (1981), y sus principales ventajas son su sencillez, bajo coste y amplia difusión. Sin embargo, presenta desventajas como son la indeterminación en el número de ciclos para la correcta caracterización de los materiales, y la falta de sensibilidad debido a la malla de 2 mm, que no permite observar la degradación de algunas muestras.
- Todos los ensayos de durabilidad deben ser completados con la realización de granulometrías por tamizado, antes y después de ensayar las muestras. Las curvas granulométricas complementan estos ensayos, minimiza los resultados contradictorios y aportan información interesante sobre el tipo y grado de ruptura.
- La microscopía óptica y electrónica han sido de gran utilidad para estudiar la mineralogía y petrografía de las muestras y, por último, identificar las texturas. Su uso se interpreta indispensable para la correcta interpretación de los ensayos químicos, y en especial estudiar la correcta proporción de cemento presente en las muestras.
- La combinación de las técnicas mineralógicas y petrográficas utilizadas permite caracterizar con buena precisión la composición química y mineralógica de las muestras, así como su textura.
- En base a los datos obtenidos, las muestras estudiadas corresponden a su mayoría a margas, más o menos arcillosas o carbonatadas, y en segundo lugar a lutitas. Unas pocas muestras se deben clasificar como calizas.
- Se ha realizado, para los materiales de Facies Tap, una clasificación visual de campo basada en la presencia de indicadores de erosión y desmoronamiento de la superficie excavada. Ésta se ha utilizado como referencia para establecer las relaciones entre los índices de durabilidad (degradabilidad y erosionabilidad) de los materiales obtenidos en el laboratorio y el comportamiento observado en los desmontes a medio-largo plazo. Así, estos desmontes se han agrupado en cinco categorías que se resumen a continuación:
 - *Tipo 1*: Desmontes que permanecen prácticamente inalterados durante el periodo de vida útil de la infraestructura.
 - *Tipo 2*: Desmontes que a largo plazo presentan un desmoronamiento esporádico de su superficie, con algunos pequeños fragmentos que se acumulan al pie de los mismos con escasa descomposición.
 - *Tipo 3*: Desmontes degradables a medio plazo, con un grado de alteración moderado. Tendencia al retroceso y caídas frecuentes de bloques, aunque la roca no llega a descomponerse.
 - *Tipo 4*: Desmontes con tendencia a presentar cárcavas, frecuentes caídas de bloques y deslizamientos superficiales. La roca se descompone en arcilla o limo.

Capítulo 9. Conclusiones y futuras líneas de investigación

- *Tipo 5*: Desmontes constituidos por arcillas y limos escasamente litificados. Acarcavamiento intenso de su superficie y formación de deslizamientos rotacionales.
- En esta Tesis se ha elaborado una clasificación operativa considerando el cemento carbonatado como un componente fundamental de la roca, para su uso en materiales detrítico-carbonatados, típicos de las Facies Tap. El objetivo básico ha consistido en agrupar los sedimentos (suelos) y rocas en una misma clasificación, tomando como base los componentes texturales de los mismos: esqueleto detrítico, matriz limo-arcillosa y cemento carbonatada.
- Los datos necesarios para clasificar las rocas han sido obtenidos mediante dos métodos: la determinación por calcimetría del contenido en cemento carbonatado y el Conteo Modal mediante Microscopio Óptico de luz polarizada. Ambos métodos proporcionan resultados consistentes entre sí, máxime si le añadimos los datos provenientes de microscopía electrónica. La calcimetría no permite discriminar entre el carbonato que actúa como cemento del carbonato como componente detrítico, por ello, estas dos técnicas se deben utilizar de forma complementaria.
- El contenido en carbonato cálcico es variable en las muestras, oscilando entre el 13% y 86% y muestra una relación aceptable con la durabilidad ($R^2=0,86$) y, por tanto, con la clasificación de desmontes propuesta.
- La utilización del SDT para evaluar el comportamiento de los materiales de la Facies Tap ha mostrado las siguientes conclusiones:
 - Los valores obtenidos en el primer ciclo de desgaste no son representativos de la durabilidad del material ya que el primer ciclo se encuentra fuertemente influenciado por el proceso de extracción y preparación de la muestra. Por tanto, éste debe ser el valor inicial a considerar, y no el de la masa inicial que equivale al valor de *Id0*.
 - Estadísticamente, la mejor opción para caracterizar correctamente la durabilidad se obtiene con la realización de seis (6) ciclos de ensayo en SDT. De esta forma, con este número de ciclos podemos discriminar cualquier comportamiento de material, y optimizar el tiempo de realización del ensayo.
 - La realización de menos de seis (6) ciclos de durabilidad puede dar lugar a errores en la interpretación de la durabilidad de los materiales. La realización de seis (6) ciclos de desgaste comporta las siguientes ventajas:
 - Permite una mejor discriminación de la durabilidad de muestras con un comportamiento inicialmente similar.
 - Se obtienen datos suficientes para valorar el posible comportamiento lineal del desgaste de las muestras.
 - Las muestras analizadas presentan un amplio rango de valores de durabilidad que oscila entre muestras muy durables con valores de *Id6* próximos a 100, y muestras de muy baja durabilidad con valores de *Id6* de 0. Además, se observa un comportamiento lineal de la durabilidad en función del número de ciclos de desgaste.
- No se ha podido observar un comportamiento diferenciado entre los desmontes que presentan materiales con textura homogénea de los que la presentan heterogénea. Por tanto, se constata que para una misma composición litológica global de la roca, el

comportamiento no varía en función de la textura. De todos modos, no hay que olvidar que un buen conocimiento de la geología regional, y de las condiciones y ambientes de depósito de las secuencias sedimentarias pueden llegar a aportar información importante en cuanto a la degradabilidad de los desmontes a medio y largo plazo, ya que nos va a permitir conocer los posibles planos de debilidad de dichos materiales por lo que se puede favorecer la alteración y degradación de los mismos.

- Por último, respecto a la utilización del SDT para predecir el comportamiento de los taludes, cabe concluirse lo siguiente:
 - Se observa una tendencia a la disminución de la durabilidad de las muestras de acuerdo con las categorías de desmonte descritas.
 - Los valores de durabilidad SDT presentan cierto solape entre las distintas categorías de desmonte, pero permiten una eficaz discriminación entre ellas. Se concluye que el índice de durabilidad obtenido a partir del SDT permite predecir la degradabilidad y desmoronamiento de los desmontes a medio y largo plazo.
 - El tipo de ensayos de durabilidad realizados permiten diferenciar entre las categorías de desmontes de tipo 3, de degradabilidad media y desmontes de tipo 4, de degradabilidad media-alta.
 - Los resultados muestran que el uso del SDT y del *Id6* puede predecir el comportamiento de los desmontes con el paso del tiempo.
 - Para mejorar la capacidad predictiva del SDT, y acotar la durabilidad de los desmontes a excavar en materiales de la Facies Tap, se recomienda utilizar (6) ciclos de ensayo y agua proveniente de la zona a realizar el desmonte, obviando la utilización de agua destilada.

En cualquier caso, se deduce la necesidad de profundizar en el conocimiento de los materiales detrítico-carbonatados de las Facies Tap y ampliar las investigaciones realizadas. Así, a modo de finalización, podríamos señalar algunos de los temas que han quedado abiertos en esta Tesis, tanto por falta de datos propios, como de estudios existentes en la Literatura y que marcan las futuras líneas de investigación en este tema:

- Mayor ajuste del sistema de clasificación petrográfica-textural de las rocas detrítico-carbonatadas asociadas a las Facies Tap, realizando una sistemática caracterización de desmontes.
- Modelado del comportamiento de los materiales de las Facies Tap, con métodos constitutivos avanzados, abarcando más zona de afloramiento.
- Estudio de la degradación progresiva de los materiales usando métodos de envejecimiento y controlando los patrones de fisuramiento.
- Mejora de la sensibilidad del *Slake Durability Test*, utilizando otros medios alternativos para su correcto ajuste a este tipo de materiales.

Todos ellos, en mayor o menor medida, llevan consigo nuevos esfuerzos en el estudio de estos materiales que pueden ayudar a clarificar bastantes conceptos oscuros existentes durante el estudio de la degradación de estos materiales como consecuencia de la excavación de un desmonte en una obra lineal.

CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA

- ADMASSU, Y; SHAKOOR, A; WELLS, N.A. Evaluating selected factors affecting the depth of undercutting in rocks subject to differential weathering. *Engineering Geology*. 2012, vol 124, p. 1-11.
- ASTM. *Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock, Construction*. West Conshohocken, PA: vol 8, section 4, 950 p.
- ASTM (D 4644-04) 2004. Standard test method for slake Durability of shales and similar weak rocks.
- BELL, F.G. The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England. *Engineering Geology*. 1978, vol 12, p. 1-29.
- BELL, F.G; MASON, T.R. The problems of flooding in Ladysmith, Natal, South Africa. En: EDDLESTON, M; MAUND, J.G (eds). *Geohazards and Engineering Geology*. Engineering Geology Special Publication, núm. 14. London: Geological Society, 1997. P. 3-10.
- BERNABÉ, J. Red fluvial y niveles de terrazas en la depresión Concentaina-Muro (Valls d'Alcoi). *Revista Saitabi*. 1975, vol 25, p. 177-194.
- BISSELL, H.J; CHILINGAR, G.V. Classification of sedimentary carbonate rocks. En: CHILINGAR, G.V; BISSELL, H.J; FAIRBRIDGE, R.W. *Carbonate Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1967. p. 87-168.
- BLATT, H. *Sedimentary Petrology*. San Francisco: W.H. Freeman & Co., 1982. 564 p. ISBN 0 7167 1354 3.
- BLATT, H; MIDDLETON, G; MURRAY, R. *Origin of Sedimentary Rocks*. 2a ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1980. 782 p. ISBN-10: 0136427103.
- BOX, M. Un aspecto del modelado de la Cuenca de Busot: Los glaciares. *Investigaciones Geográficas*. 1983, núm. 1. p. 181-198.
- BRACE, W.F. *Experimental Study of the Indentation of Rocks and Minerals*. MIT, Cambridge, Mass. 81 p.
- CANO, M; TOMÁS, R; GARCÍA-BARBA, J. "Análisis de las medidas correctoras en inestabilidades de taludes con litologías carbonatadas tipo flysch de la provincia de Alicante". En: ALONSO, E; COROMINAS, J; HÜRLIMAN, M (eds). *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, (Palma de Mallorca 11-14 de junio de 2013). Barcelona: CIMNE, 2013. ISBN: 978-84-941004-9-9
- CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. *Trans, ASCE*. 1948, vol 113, p. 901-991.
- CHIGIRA, M; NAKAMOTO, M; NAKATA, E. Weathering mechanisms and their effects on the landsliding of ignimbrite subject to vapor-phase crystallization in the Shirakawa pyroclastic flow, northern Japan. *Engineering Geology*. 2002, vol 66, p. 111-125.

Capítulo 10. Bibliografía

- CHIGIRA, M; YOKOYAMA, O. Weathering profile of non-welded ignimbrite and the water infiltration behavior within it in relation to the generation of shallow landslides. *Engineering Geology*. 2005, vol 78, p. 187-207.
- CHILINGAR, G.V; BISSLE, H.J; FAIRBRIDGE, R.W. Carbonate Rocks: Origin, Occurrence and Classification. *Carbonate rocks. Developments in sedimentology*. Amsterdam: Elsevier. 1967, vol 1, 471 p.
- CZEREWKO, M.A; CRIPPS, J.C. Assessing the durability of mudrocks using modified jar slake index test. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hidrogeology Geological Society of London*. 2001, vol 34, núm. 2, p. 153 – 156.
- D'Appolonia Consulting Engineers. *Environmental Effects of Slaking of Surface Mine Spoils Eastern and Central United States*. Final Report, J0285024. Prepared for: U.S.D.I. Bureau of Mines 1980, p. 232.
- DEO, P. "Shales as embankment materials". PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, 1997.
- DHAKAL, G, et al. Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 2002, vol 65, p. 31-45.
- DICK, J; SHAKOOR, A. Lithological controls of mudrock durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 1992, vol25, p. 31-46.
- DICK, J; SHAKOOR,A; WELLS, N. A geological approach toward developing a mudrock-durability classification system. *Canadian Geotechnical Journal*. 1994, vol 31, p. 17–24.
- DOBERENIER, L; DE FREITAS, M.H. Geotechnical properties of weak sandstones. *Geotechnique*. 1986, vol 36, p. 79-94.
- DUNHAM, R.J. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. En: HAMM, W.E. (ed). *Classification of Carbonate Rocks, A Symposium*. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1962. p. 108-121.
- DUSSEAULT, M.B, et al. Rapid index tests for transitional materials. *ASTM Geotechnical Testing Journal*. 1972, vol 6, núm. 2, p. 64-72.
- EMBRY, A.F; KLOVAN, J.E. Absolute water depth limits of Late Devonian paleoecological zones. *Geol. Rundsh*. 1972, vol 61, p. 672-686.
- ERGULER, Z.A; SHAKOOR, A. Relative contributions of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. *Engineering Geology*. 2009, vol 108, p. 36-42.
- ERGULER, Z.A; ULUSAY, R. A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) Clay. *Engineering Geology*. 2003, vol 67, núm 3-4, p. 331-352.
- ERGULER, Z.A; ULUSAY, R. Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology*. 2009, vol 105, p. 11-19.

Capítulo 10. Bibliografía

- ESTÉVEZ, A, et al. Geología de la provincia de Alicante. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 2004, vol 12, núm 1, p. 2-15.
- FAHY, M.P; GUCCIONE, M.J. Estimating strength of sandstones using petrographic thin-section data. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 1979, vol 16, núm. 4, p. 467-485.
- FRANKLIN, J.A. A "Shale Rating System" and Tentative Applications to Shale Performance. En: *TRB Symposium, Properties and Performance of Shales*. Washington, DC. 1981, 22 p.
- FRANKLIN, J.A; CHANDRA, R. The slake-durability test. *International Journal of Mechanics and Mining Sciences*. 1972, vol 9, p. 325-341.
- FRANKLIN, J.A. "Evaluation of Shales for Construction Projects: an Ontario shale rating system: Report RR29". Research and Development Branch. Ministry of Transportation and Research. Toronto, 1983.
- FRIEDMAN, G.M; SANDERS, J.E. *Principles of sedimentology*. Nueva York: John Wiley and Sons Inc, 1978. 792 p. ISBN 10: 0471752452 / 0-471-75245-2
- FRIEDMAN, G.M; SANDERS, J.E; KOPASKA-MERKEL, D.C. *Principles of sedimentary deposits: stratigraphy and sedimentology*. Nueva York: Maxwell MacMillan International, 1992. 717 p. ISBN: 0023393599
- FRYDMAN, S, et al. Landslides and residual strength in marl profiles in Israel. *Engineering Geology*. 2007, vol 89, p. 36-46.
- GAMBLE, J.C. "Durability-Plasticity Classification of Shales and Other Argillaceous Rocks". Tesis no publicada. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. 1971, 161 p.
- GARRIDO, M.E; PRECIADO, J.I; HIDALGO, C. *Prácticas de laboratorio. Geotecnia y cimientos I*. Valencia: Editorial UPV, 2010. 264 p. Ref.: 2010.418.
- GARRIDO, M.E, et al. Geotecnia y Cimientos: Cuaderno de prácticas de laboratorio. 1a ed. Valencia: Editorial de la UPV, 2012.
- GAUTAM, T. P; SHAKOOR, A. Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions. *Engineering Geology*. 2013, vol 166, p. 17-25.
- GILBERT, C.M. Sedimentary Rocks. En: WILLIAMS, H. *Petrography*. San Francisco: Freeman, 1954. p 251-384.
- GÖKÇEOĞLU, C; ULUSAY, R; SÖNMEZ, H. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*. 2000, vol 57, p. 215-237.
- GÖKÇEOĞLU, C; AKSOY, H. New approaches for the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses. *Engineering Geology*. 2000, vol 58, núm.1, p. 1-23.
- GRABAU, A.W. On the classification of sedimentary rocks. *American Geologist*. 1904, vol 33, p. 228-247.

Capítulo 10. Bibliografía

- GRAINGER, P. The classification of mudrocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 1984, vol 17, núm. 4, p. 381-387.
- GUIMERA, J, et al. *Història natural dels Països Catalans. Vol. 2, Geologia (II)*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 1992. 548 p. ISBN: 8477394008
- GUPTA, V; AHMED, I. The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. *Engineering Geology*. 2007, vol 95, p. 79-87.
- HALE, P.A; SHAKOOR, A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience*. 2003, vol 9, núm. 2, p. 117-130.
- HALLSWORTH, C.R; KNOX, R.W.O'B (1999). "BGS Rock Classification Scheme. Volume 3. Classification of sediments and sedimentary rocks". British Geological Survey. Research Report number rr 99-03. Nottingham UK. 44 p.
- HUDEC, P.P. Statistical analysis of shale durability factors. *Transport Research Record*. 1982, vol 873, p. 28-35.
- IGME (1974). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Canals. 794". Instituto Geológico y Minero de España. 37 p. Madrid.
- IGME (1981). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Játiva. 795". Instituto Geológico y Minero de España. 28 p. Madrid.
- IGME (1975). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Gandía. 796". Instituto Geológico y Minero de España. 27 p. Madrid.
- IGME (1975). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Onteniente. 820". Instituto Geológico y Minero de España. 49 p. Madrid.
- IGME (1975). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Alcoy. 821". Instituto Geológico y Minero de España. 31 p. Madrid.
- IGME (2008). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Benissa. 822". Instituto Geológico y Minero de España. 72 p. Madrid.
- IGME (1975). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Jávea. 823. Instituto Geológico y Minero de España". 15 p. Madrid.
- IGME (1978). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Castalla. 846". Instituto Geológico y Minero de España. 32 p. Madrid.
- IGME (1981). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Villajoyosa. 847". Instituto Geológico y Minero de España. 26 p. Madrid.
- IGME (2008). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Benidorm. 848". Instituto Geológico y Minero de España. 73 p. Madrid.

Capítulo 10. Bibliografía

- IGME (1978). “Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Elda. 871”. Instituto Geológico y Minero de España. 64 p. Madrid.
- ISRM. En: BROWN, E.T (ed). *Suggested method: Rock Characterization, Testing and Monitoring*. Oxford: Pergamon Press. 1981, 211 p.
- ISRM. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. En: ULUSAY, R; HUDSON, J.A (eds). *Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods*. International Society for Rock Mechanics (ISRM). Kozan Ofset, Ankara, Turkey. 2007.
- KHALILY, M, et al. Durability Characterization of Abderaz Marly Limestone in the Kopet-Dagh Basin, NE of Iran. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013, vol 3, núm. 5.
- KOLAY, E; KAYABALI, K. Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach. *Engineering Geology*. 2006, vol 86, p. 271-284.
- KONCAGÜL, E.C; SANTI, P.M. Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999, vol 36, p. 139-153.
- KRYNINE, P.D. The megascopic study and field classification of sedimentary rocks. *Journal of Geology*. 1948, vol 56, p. 130-165.
- MARTÍNEZ-BOFILL, J. “Criterios para determinar la degradabilidad y durabilidad de las rocas arcillosas y su aplicación a excavaciones y desmontes”. Directores: Jordi Corominas Dulcet y Albert Soler Gil. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d’Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2011.
- MARTÍNEZ-BOFILL, J, et al. Influencia en la Durabilidad de las Rocas Blandas: Aplicación a Taludes en Gipuzkoa. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. 2011, núm 15.
- MARTÍNEZ-BOFILL, J, et al. “Propuesta de mejora de la sensibilidad del ensayo Slake Durability Test para la caracterización de taludes excavados en rocas arcillosas”. En: ALONSO, E; COROMINAS, J; HÜRLIMANN, M (eds). *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, (Palma de Mallorca 11-14 de junio de 2013).Barcelona: CIMNE, 2013. ISBN: 978-84-941004-9-9
- MIŠČEVIĆ, P; ROJE-BONACCI, T. Weathering process in Eocene flysch in región of Split (Croatia). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2001, vol 13, p. 47-55.
- MIŠČEVIĆ, P; VLASTELICA, G. Time-dependant stability of slopes excavated in marl. *Građevinar*. 2012, vol 64, p. 451-461.
- MOON, V.G; BEATTIE, A.G. Textural and microstructural influences on the durability of Waikato Coal Measures mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 1995, vol 28, p. 303-312.

Capítulo 10. Bibliografía

- MORADIAN, Z.A, et al. Predicting slake durability index of soft sandstone using indirect tests. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2010, vol 47, p. 666-671.
- MORALEJO, A."Caracterización Geomecánica de los Materiales Miocenos Margosos en Facies Tap. Aplicación al Análisis de la Estabilidad de los Desmontes del Tramo Nudo de la Encina-Mogente de la L.A.V. Madrid-C. La Mancha-C. Valenciana- Región de Murcia". Tutor: Francisco A. Izquierdo Silvestre. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, 2011.
- MORILLA, I. Interpretación de los Ensayos Geotécnicos en Suelos. 1a ed. Madrid: Ignacio Morilla Abad, 2012. 622 p. ISBN: 978-84-616-0313-8.
- MORIWAKI, Y; MITCHELL, J.K. The role of dispersion in slaking of intact clay. En: SHERARD, J.L; DECKER, R.S. (eds). *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Proyects*. ASTM STP, vol 623. American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 1977, p. 287-302.
- NAVARRO, J.J; FUSTER A. *Supresión de dos puentes de carga limitada y Variante de Montaverner en la CN-340 (S), P.K. 825,000 al 829,700*. Informe inédito. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1996.
- NICHOLS, G. *Sedimentology and Stratigraphy*.2a ed. Oxford: Willey-Blackwell, 2009. 432 p. ISBN: 978-1-4051-3592-4
- NLT-102/98 (1998). Humedad mediante secado en estufa.
- NLT-104/91 (1991). Granulometría de suelos por tamizado.
- NLT-105/98 (1998). Límite líquido por el método de la Cuchara de Casagrande.
- NLT-106/98 (1998). Límite plástico de un suelo.
- NLT-108/98 (1998). Apisonado Proctor modificado.
- NLT-116/91 (1991). Determinación del contenido de carbonato en los suelos.
- NLT-118/98 (1998). Determinación del contenido de materia orgánica en suelos por el método del permanganato potásico.
- NLT-120/72 (1972). Contenido de sulfatos solubles en los suelos.
- NLT-204/72 (1972). Densidad mínima de una arena.
- NLT-205/91 (1991). Determinación de la densidad máxima de una arena por el método de apisonado.
- NLT-206/91 (1991). Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática.
- NLT-207/91 (1991). Dispersabilidad por tubificación.
- NLT-211/91 (1991). Determinación del peso específico de las partículas de un suelo.

Capítulo 10. Bibliografía

- NLT-251/91 (1991). Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas.
- OLIVIER, H.J. A new engineering-geological rock durability classification. *Engineering Geology*. 1979, vol 14, p. 255-279.
- ORTOLANO, I; CUADRADO, A. *Proyecto de Construcción Variante de la Carretera N-332 del P.K. 175.190 AL 179.650. Tramo: Variante de Benissa (Alicante)*. Ministerio de Fomento, 2006.
- PARDO, I; SEVA, E; MARTÍN, J. Estructuras de abancalamiento como reserva y conexión de la vegetación natural: modelo espacial aplicado a un valle bien gestionado del norte de Alicante. *Mediterránea. Serie de Estudios Biológicos*. 2005, Época II, núm 18. ISSN 1130-6230.
- PETTIJOHN, F.J. *Sedimentary Rocks*. 2a ed. New York: Harper & Row, 1957. 718 p. ISBN-10: 0060451904.
- PETTIJOHN, F.J; POTTER, P.N; SIEVER, R. *Sand and sandstone*. Nueva York: Springer, 1972. 618 p. ISBN: 978-0-387-90071-1
- PETTIJOHN, F.J. *Sedimentary Rocks*. New York: Harper & Row, 1957. 718 p.
- RINTRAWILAI, S. "Large-scaled Slake Durability Index Tests of some weak rocks". Tutor: Kittitep Fuenkajorn. Suranaree University of Technology, 2010.
- SADISUN, L.A, et al. Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2005, vol 23, p. 199-218.
- SANTANACH, P, et al. *Història natural dels Països Catalans. Vol 1, Geologia (I)*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 1986. 439 p. ISBN: 8485194888
- SANTI, P.M. Improving the Jar Slake, Slake Index, and Slake Durability Tests for Shales. *Environmental & Engineering Geoscience*. 1998, vol 4, núm 3, p. 385-396.
- SANTI, P.M. Field Methods for Characterizing Weak Rock for Engineering. *Environmental & Engineering Geoscience*. 2006, vol 12, núm 1, p. 1-11.
- SANTI, P.M; HIGGINS, J.D. Methods for Predicting Shale Durability in the Field. *Geotechnical Testing Journal*. 1998, vol 21, núm 3, p. 195-202.
- SANZ DE GALDEANO, C; VERA A.J. Una propuesta de clasificación de las cuencas neógenas béticas. *Acta Geológica Hispánica*. 1991. vol 26, núm 3-4, p 205-227.
- SCHOLLE, P.A. *A Color Illustrated Guide to Constituents, Textures, Cements, and Porosities of Sandstones and Associated Rocks, (AAPG Memoir 28)*. 1a ed. Tulsa, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists, 1979. 201 p. ISBN: 0891813047.
- SHAKOOR, A; BONELLI, R.E. Relationship between petrophysical characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstones. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 1991, vol 28, p. 55-71.

Capítulo 10. Bibliografía

- SINGH, T.N, et al. Slake durability study of shaly rock and its predictions. *Environmental Geology*. 2005, vol 47, p. 246-253.
- TAYLOR, R.K. Coal Measures mudrocks: composition, classification and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 1988, vol 21, p. 85-99.
- TAYLOR, R.K; SPEARS, D.A. Laboratory investigation of mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1981, vol 14, p. 291-309.
- TORRIJO, F.J; CORTÉS, R. *Los suelos y las rocas en ingeniería geológica: Herramientas de estudio*. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2007, 204 p. ISBN: 978-84-8363-097-6
- TU, X.B, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*. 2009, vol 105, p. 134-150.
- TUCKER, M.E. *Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 2a ed. Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne, Paris, Berlin, Vienna: Blackwell Scientific, 1991. viii + 260 pp. ISBN: 0 632 02959 5.
- TWENHOFEL, W.H. Terminology of the fine-grained mechanical sediments. *Nat. Res. Council Ann. Rept.* 1937, App. 1, Rept. Comm. Sedimentation, p 81-104.
- ULUSAY, R; OZKAN, I; ÜNAL, E. Characterization of weak stratified and clay-bearing rock masses for engineering applications. En: MYER, L.R et al., (eds). *Fractured and Jointed Rock Masses Conference* (Lake Tahoe, CA. A.A. 3-5 de junio de 1992). Balkema, Rotterdam. 1995, p. 229-235.
- UNE 103101 (1995). Análisis granulométrico por tamizado.
- UNE 103102 (1995). Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.
- UNE 103103 (1994). Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- UNE 103104 (1993). Determinación del límite plástico de un suelo.
- UNE 103105 (1993). Determinación de la densidad mínima de una arena.
- UNE 103106 (1993). Determinación de la densidad máxima de una arena por el método de apisonado.
- UNE 103108 (1996). Determinación de las características de retracción de un suelo.
- UNE 103200 (1993). Determinación del contenido de carbonatos en los suelos.
- UNE 103201 (1996). Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo.
- UNE 103204 (1993). Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.
- UNE 103300 (1993). Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

Capítulo 10. Bibliografía

- UNE 103301 (1994). Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática.
- UNE 103302 (1994). Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.
- UNE 103400 (1993). Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo.
- UNE 103401 (1998). Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo.
- UNE 103402 (1998). Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial.
- UNE 103405 (1994). Geotecnia. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.
- UNE 103501 (1994). Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado.
- UNE 103601 (1996). Ensayo del hinchamiento libre de un sueledde suelo en el equipo triaxial.
- UNE 103602 (1996). Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro

- USGS (2004). North American Geologic-Map Data Model Science Language Technical Team, 2004, Report on progress to develop a North American science-language standard for digital geologic-map databases; Appendix C1 – Sedimentary materials: Science language for their classification, description, and interpretation in digital geologic-map databases; Version 1.0 (12/18/2004), in Soller, D.R., ed., Digital Mapping Techniques '04—Workshop Proceedings: U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1451, 595 p. Appendix C1.
- VERA, J.A. *Estratigrafía: Principios y métodos*. Madrid: Rueda, 1994. 816 p. ISBN: 9788472070745.
- WILLIAMS, B.P.J; ALLEN, J.R.L; MARSHALL, J.D. Old Red Sandstone facies of the Pembroke peninsula, south of the Ritec fault. En: BASSET, M.G. (ed). *Geological Excursions in Dyfed, South-west Wales*. Cardiff: National Museum of Wales, 1982. p. 151-174.
- WOOD, L.E; DEO, P. A suggested system for classifying shales materials for embankments. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 1975, vol 12, núm 1, p. 39-55.
- WRIGHT, V.P. A revised classification of limestones. *Sedimentary Geology*. 1992, vol 76, núm. 3-4, p. 177-185.