Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TREBALL FINAL DE MÀSTER

HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOUR OF WATER-REPELLENT GRAVELS

Treball realitzat per:
Marina MONSERRAT AMAT

Dirigit per:
Eduardo ALONSO PÉREZ DE ÁGREDA
Anna RAMON TARRAGONA

Màster en:
Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 25 de gener de 2017

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a los profesores Eduardo Alonso, Enrique Romero y en especial, a Anna Ramon por su tiempo y dedicación.

También me gustaría agradecer al personal del laboratorio del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, José Álvarez y Rodrigo Gómez su gran ayuda en el laboratorio especialmente cuando surgieron problemas. Aprecio mucho su buen humor y su ayuda durante todo el desarrollo experimental.

Quisiera hacer una mención especial a Mauricio Tapias, quien tuvo la amabilidad de prestarme parte de su equipo además de tomarse la molestia de ayudarme a encontrar todas las piezas necesarias para poner operativo un segundo edómetro. Sin este segundo equipo no hubiera sido posible realizar todos los ensayos a tiempo.

Agradecer a Javier Carretero su desinteresada colaboración al dejarme usar las instalaciones del Laboratorio la sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

También me gustaría agradecer a Clara Alvarado y a Sajjad Mirsalehi el hecho de que me mostraran detalladamente el funcionamiento de los equipos.

Finalmente, también me gustaría mencionar a todos los compañeros con quienes coincidí en el laboratorio. Su simpatía hizo mucho más agradable los largos días de trabajo experimental. En especial, agradecer a Fernando su ayuda para desmontar el edómetro tras cada ensayo.

RESUMEN

El comportamiento de escolleras y gravas ha sido ampliamente estudiado debido al gran número de aplicaciones de estos materiales en ingeniería civil. Las escolleras experimentan una deformación de colapso bajo carga constante cuando son inundadas. Esta deformación es el resultado de la rotura de partículas. La aceleración de la rotura de partículas y la propagación de fracturas en el interior de las partículas son los principales fenómenos relacionados con la influencia de la succión en escolleras. Oldecop y Alonso (2001) propusieron un modelo constitutivo elastoplástico para describir el comportamiento de las escolleras en el cual se incluye el efecto de la humedad relativa. Los parámetros que describen el modelo tienen sentido físico y se pueden calcular a partir de ensayos edométricos básicos. Desde entonces, se han desarrollado numerosas investigaciones sobre la compresibilidad de escolleras en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC.

El objetivo principal de la presente tesina es estudiar experimentalmente el efecto de recubrimientos hidrófobos en gravas en la rotura de partículas y, como consecuencia, su contribución en la compresibilidad y en el colapso bajo carga y saturación de la escollera. Con este fin se ha estudiado la teoría básica y los mecanismos que aparecen en materiales hidrófobos. El estado del arte recopila los tratamientos ya existentes disponibles en la literatura.

En el trabajo experimental se ha propuesto un tratamiento hidrófobo a base de Dimethyldiclorosilano (DMDCS) para recubrir las gravas de pizarras del río Pancrudo. La hidrofobicidad de las partículas finales recubiertas ha sido verificada obteniendo ángulos de contacto de ≈100º.

La campaña de ensayos está constituida principalmente por dos tipos de ensayo con el objetivo de evaluar la eficacia de las gravas hidrófobas. En primer lugar, se han realizado diversos ensayos de compresión uniaxial de una partícula irregular de roca entre dos placas de acero para reproducir las fuerzas que aparecen en los contactos de una partícula individual. A continuación, el comportamiento global de la estructura se ha estudiado mediante ensayos edométricos usando células Rowe de 150 mm de diámetro. El conjunto de ensayos se llevó a cabo en pizarras cuarcíticas obtenidas por machaqueo manual con diámetros comprendidos entre 20 mm y 30 mm. La mitad de las muestras fueron tratadas con el tratamiento a base de DMDCS para poder comparar resultados. Las condiciones de carga y succión, así como el proceso seguido fueron exactamente idénticos durante toda la campaña de ensayos.

Los resultados de los ensayos edométricos han sido modelizados numéricamente con el modelo constitutivo elastoplástico propuesto por Oldecop y Alonso (2001). Los valores de los parámetros obtenidos experimentalmente, para las gravas hidrofóbicas y para el material natural, permiten cuantificar la contribución del recubrimiento hidrófobo en escolleras.

A nivel individual de las partículas, el tratamiento es eficaz. Con el recubrimiento a base de DMDCS, se consigue que las partículas en condiciones mojadas alcancen la misma resistencia a compresión uniaxial que en condiciones secas. En el estudio de las estructuras de escollera, una observación favorable fue la reducción de la

deformación de colapso en un 50%. Sin embargo, las deformaciones finales fueron del mismo orden de magnitud tanto en el material tratado como en el material natural. Este hecho se debe al carácter superficial del tratamiento. Una vez se rompe por primera vez la partícula, el recubrimiento hidrófobo deja de ser continuo y la estructura vuelve a ser vulnerable frente al agua. Además, también se observó un aumento de la compresibilidad en condiciones secas. Teóricamente, si no se introduce la humedad relativa en la ecuación, el comportamiento del material tratado y natural debería coincidir. Se piensa que este fenómeno podría ser consecuencia de los procedimientos seguidos en el tratamiento. Para obtener el recubrimiento hidrófobo es necesario sumergir la muestra en una mezcla de DMDCS y agua. Se sospecha que el recubrimiento se adhiere en las partículas dejando atrapada cierta cantidad de agua en sus fisuras.

ABSTRACT

Behaviour of rockfill and gravels has been widely studied due to the large number of applications of these materials in civil engineering. It is known that rockfill experiences collapse deformation under constant load when it is soaked. Acceleration of breakage of rock particles and fracture propagation are the main phenomena related to suction effects on rockfill. Oldecop & Alonso (2001) proposed an elastoplastic constitutive model which included the subject of relative humidity. The parameters describing the model have physical meaning and can be computed from basic oedometer tests. Since then, many studies about rockfill compressibility have been conducted in the Department of Geotechnical Engineering and Geosciences of UPC.

The aim of the present Master Thesis is to investigate the effect of water-repellent coatings on particle breakage of gravels and therefore, on rockfill collapse under load and soaking. To do so, the basic theory and mechanisms of hydrophobic materials have been reviewed. The state of the art gathers existing treatments available in literature.

A hydrophobic treatment consisting of Dichlorodimethylsilane (DCDMS) has been proposed to coat the Pancrudo slate. The hydrophobicity of the final coated particles has been verified.

The testing campaign consisted in two main tests in order to assess the effectiveness of the water-repellent gravels. Compression of irregular rock particles between two steel plates was performed to simulate contact forces applied on an individual particle. Global structural behaviour was simulated with oedometer tests using 150 mm diameter Rowe cells. All the laboratory tests were performed on manual crushed quartzitic slate with diameters between 20 mm and 30 mm. Half of the samples were coated with the proposed DCDMS treatment for comparison purposes. Loading and suction conditions were consistent throughout all the testing campaign

The oedometer tests have been numerically modelled using the macroscopic constitutive model for rockfill proposed by Oldecop y Alonso (2001). The obtained values of the model parameters, for hydrophobic gravels and natural material, allow for quantification of the effect of the water-repellent coating.

For individual particles, the treatment showed a good response. Soaked DCDMS coated particles reached the same compression strength as dry DCDMS coated particles. When the global rockfill structure was studied, a reduction in 50% of collapse deformation was observed. Nevertheless, final deformations were in the same order of magnitude regardless of the coating. These observations are caused due to the superficial character of the treatment. Once the particle splits, the coating is no longer continuous and rockfill structure is exposed to water. In addition, compressibility under dry conditions is increased when a hydrophobic coating is applied. Theoretically, if water is not introduced in the equation, treated and non-treated materials should experience the same behaviour. The explanation underlying this phenomenon might be encouraged in the procedure followed during the hydrophobic treatment. Samples need to be soaked in a mixture of DCDMS and water in order to obtain the coating. Hence,

the possibility that water is trapped between the rock cracks and the coating is contemplated.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. MOTIVACIÓN 1

1.2. OBJETIVOS 1

1.3. CONTENIDOS 2

2. ESTADO DEL ARTE 4

2.1. COLAPSABILIDAD Y DEFORMABILIDAD DE ESCOLLERAS 4

2.1.1. OBSERVACIONES DEL COMPORTAMIENTO EN ESCOLLERAS 4

2.1.2. ROTURA DE PARTÍCULAS 6

2.1.3. APERTURA Y PROPAGACIÓN DE FISURAS 9

2.1.4. PARÁMETROS DE LA ROTURA DE PARTÍCULAS 12

2.2. MODELO ELASTOPLÁSTICO EDOMÉTRICO PARA ESCOLLERAS 13

2.2.1. MODELO CONCEPTUAL 13

2.2.2. FORMULACIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO 17

2.2.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EXPERIMENTALES 22

2.3. TEORÍA DE LA MOJABILIDAD 24

2.3.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO 24

2.3.2. ÁNGULO DE CONTACTO 26

2.3.2.1. Superficies ideales 26

2.3.2.2. Superficies rugosas 27

2.4. SUPERFICIES HIDRÓFOBAS ARTIFICIALES 31

2.4.1. RECUBRIMIENTOS PROBADOS EN SUELOS 32

2.4.1.1. Tratamientos a base de Dimethyldiclorosilano (DMDCS) 32

2.4.1.2. Tratamientos a base de n-octyltriethoxysilano 34

2.4.2. RECUBRIMIENTOS NO PROBADOS EN SUELOS 35

2.4.2.1. Tratamientos a base de Polydimethysiloxane (PDMS) 35

2.4.2.2. Tratamientos para hormigones 36

2.5. MOJABILIDAD DE SUELOS 38

2.5.1. TEORÍA DE LA MOJABILIDAD 38

2.5.2. TÉCNICAS PARA MEDIR LA MOJABILIDAD 39

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL 44

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL 44

3.1.1. PIZARRA CUARCÍTICA 44

3.1.2. GRAVA CALIZA 45

3.2. AGENTE HIDRÓFOBO 47
3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS 49
3.3.1. EQUIPO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL DE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO 49
3.3.2. EDÓMETRO ϕ=150 MM 51
3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS 53
3.4.1. TRATAMIENTO HIDRÓFOBO 53
3.4.2. COMPRESIÓN UNIAXIALDE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO 54
3.4.2.1. Partículas ensayadas 55
3.4.2.2. Preparación de las muestras 56
3.4.2.3. Nomenclatura de los ensayos 58
3.4.3. ENSAYOS EDOMÉTRICOS 58
3.4.3.1. Granulometría 59
3.4.3.2. Preparación de las muestras 60
3.4.3.3. Trayectorias tensionales. 62
3.4.3.4. Nomenclatura de los ensayos 64
4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 66
4.1. ÁNGULO DE CONTACTO 66
4.2. COMPRESIÓN UNIAXIAL DE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO 70
4.3. ENSAYOS EDOMÉTRICOS 73
4.3.1. ENSAYOS PRELIMINARES 73
4.3.2. ENSAYOS CON GRANULOMETRÍA UNIFORME DE DIÁMETRO MÁXIMO IGUAL A 30 MM. INUNDACIÓN DIRECTA 75
4.3.2.1. Evolución de la granulometría 76
4.3.2.2. Curvas tensión - deformación 80
4.3.3. ENSAYOS CON GRANULOMETRÍA UNIFORME DE DIÁMETRO MÁXIMO IGUAL A 30 MM. SATURACIÓN CON VAPOR DE AGUA. 86
4.3.3.1. Evolución de la granulometría 86
4.3.3.2. Curvas tensión – deformación 89
4.3.4. DEFORMACIÓN DEPENDIENTE DEL TIEMPO. 93
5. CONCLUSIONES 97
5.1 FUTURAS LíNEAS DE INVESTIGACIÓN 99
6. BIBLIOGRAFÍA 101
ANEJO I: RESULTADOS 106
ANEJO II: REPORTAJE FOTOGRÁFICO 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Modelo capilar simplificado en esferas. (a) Fuerza de atracción entre dos esferas normalizada y (b) fuerzas capilares en distintos tamaños de granos. (Alonso basándose en Gili, 1988). 4
Figura 2-2: Dependencia temporal de los asientos registrados en diferentes presas. (Parkin, 1977). 5
Figura 2-3 : Asientos de la presa de Dix durante un periodo de inundaciones. (Nobari y Duncan, 1972). 6
Figura 2-4: Presa de Beliche. (a) Intensidades de lluvia y nivel de embalse y (b) asientos verticales medidos y estimados por Naylor et al. (1997). (Alonso, Olivella y Pinyol, 2005). 6
Figura 2-5: Ensayos de compresión de una partícula irregular de roca entre dos placas de acero (Oldecop, 2013, basándose en Lee (1992)). (a) Esquema de ensayo y (b) relación típica entre la fuerza aplicada y el desplazamiento. 7
Figura 2-6: Variación de la resistencia a la rotura en función del tamaño de partícula para diferentes gravas y escolleras (Oldecop, 2013). 8
Figura 2-7 : Modos de fractura. A modo I (modo de apertura), B modo II (modo de cizallamiento) y C modo III (modo de rasgado) (Atkinson, 1987). 10
Figura 2-8: Cinética del crecimiento subcrítico de fisuras (Oldecop y Alonso, 2001)… 11
Figura 2-9: Definición de los diferentes parámetros de rotura de partículas (Indraratna basado en Lade et al., 1996). 13
Figura 2-10: (a) Estructura de escollera formada por múltiples partículas con fisuras y (b) partícula de roca sujeta a fuerzas de contacto (Oldecop y Alonso, 2007). 15
Figura 2-11: Modelo analítico desarrollado para el estudio de la deformabilidad de la escollera en función del tiempo. (Oldecop y Alonso, 2007). 15
Figura 2-12: Evolución del factor de intensidad de tensiones (K) para diferentes apeturas iniciales de grieta bajo una tensión constante e igual a 5 MPa. Resultados analíticos del modelo propuesto (Odecop y Alonso, 2007). 16
Figura 2-13 : Elementos básicos del modelo elastoplástico para escolleras formulado por Oldecop y Alonso (2001). (a) Superficie de fluencia en el espacio tensión-succión total y (b) Trayectorias tensión-deformación para un estado seco y húmedo de la muestra. (Oldecop y Alonso, 2013). 17
Figura 2-14 : Superficies de fluencia calculadas a partir de los parámetros obtenidos experimentalmente. (a) Oldecop y Alonso (2001) y (b) Oldecop y Alonso (2003). 21
Figura 2-15: Índice de compresibilidad dependiente del tiempo en función de la carga y de la succión (Oldecop y Alonso, 2007). 22
Figura 2-16: Deformación por colapso en función de la succión total para una tensión vertical de 0,6 MPa (test 3 y 4) (Oldecop y Alonso, 2001). 23
Figura 2-17 : Balance de fuerzas intermoleculares de un líquido. Diferencia entre una molécula en superficie y una en el interior del líquido. 24

Figura 2-18: Distintos grados de mojabilidad entre un líquido y un sólido (Marmottant, 2008. Recuperado http://wikipedia.com)..... 25
Figura 2-19: Distintos grados de mojabilidad entre un líquido y un sólido. 25
Figura 2-20: Efecto de la capilaridad y balance de fuerzas presentes. Analogía con la mojabilidad líquido – superficie sólida (recuperado de http://wikipedia.com). 26
Figura 2-21: Ángulo de contacto (Gillis, 2006. Recuperado de http://wikipedia.com). 26
Figura 2-22: Relación entre el ángulo de contacto y la mojabilidad (recuperado de http://www.sciencebrainwaves.com)..... 27
Figura 2-23: Aproximación de Wenzel. Válida para una interfaz homogénea sólido-líquido (Biolin Scientific, 2008 y Nosonovsky (2009). 28
Figura 2-24: Evolución del ángulo de contacto de la aproximación de Wenzel respecto al ángulo de contacto de Young para distintos valores de rugosidad (Banerjee, 2008). 28
Figura 2-25: Aproximación de Cassie-Baxter. Válida para superficies heterogéneas (Banerjee, 2008 y Nosonovsky (2009). 29
Figura 2-26: Evolución del ángulo de contacto de la aproximación de Cassie-Baxter respecto al ángulo de contacto de Young para distintos valores de rugosidad y de fracción sólida. 30
Figura 2-27 : Evolución del ángulo de contacto del modelo Cassie-Baxter's en función de r, fs y del ángulo de contacto de Young (Banerjee, 2008). 31
Figura 2-28: Química entre los hidroxilos de la superficie del suelo con el DMDCS. 32
Figura 2-29: Configuración molecular (a) del suelo natural y (b) del suelo tratado. (Ng y Lourenço, 2015)..... 33
Figura 2-30 : Reacción química entre los hidróxilos de la superficie del suelo con el n-octyltriethoxysilane. Como resultado se obtiene un recubrimiento hidrófobo estable junto con etanol. (Da Re, 2000)..... 34
Figura 2-31: Grupos de tratamientos superficiales: (a) recubrimientos y selladores (b) agentes hidrófobos (c) inhibidores de poros (adaptación de Keer, 1992)..... 36
Figura 2-32: Estructura molecular de los silanos y los siloxanos (Medeiros et al., 2015)..... 37
Figura 2-33: Enlace químico entre el agente hidrófobo y el hormigón (Medeiros et al., 2015). 37
Figura 2-34 : Representción esquemática de la interacción del agua con partículas hidrófilas y hidrófobas (Bachmann et al, 2008). 38
Figura 2-35: Esquema de la técnica SDM para la medición del ángulo de contacto estático (Bachmann et al., 2000). 40
Figura 2-36: Método WPM para medir ángulos de contacto: (a) representación esquemática de la configuración del experimento i (b) las fuerzas que actúan en la placa durante la inmersión (FI) o durante el levantamiento (FL). Definición de las etapas 1 a 4 citadas en el texto (Bachmann et al., 2003)..... 42

Figura 3-1 : Curva de retención de la pizarra del río Pancrudo. Datos experimentales y curvas ajustadas a las ramas de secado y mojado. (Oldecop y Alonso, 2000)). 45
Figura 3-2: Capazo con gravas calizas disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas. 45
Figura 3-3: Curva de retención de la caliza del Garraf. Datos experimentales y curvas ajustadas a las ramas de secado y mojado. (Alonso et al., 2016). 46
Figura 3-4 : Ascensión capilar en poros con diferentes secciones (Tuller y Or, 2003). 47
Figura 3-5: Muestras M2 y M3 secandose para ser tratadas con DMDCS. 48
Figura 3-6 : Elementos del quipo de compresión uniaxialde una partícula irregular de roca entre dos placas de acero. (a) Placas de acero, (b) bases, (c) barras verticales, (d) guías, (e) tornillos, (f) anillas herméticas y (g) peón. 49
Figura 3-7: Equipo de compresión uniaxial montado. 50
Figura 3-8: Prensa con equipo de compresión uniaxial. 51
Figura 3-9: Elementos del edómetro. (a) Anillo edométrico, (b) base inferior, (c) cabezal superior, (d) anillas de asiento de la membrana, (e) membrana de látex unida al vástago y a la tapa, (f) marco y (g) tornillos. 52
Figura 3-10: Circuito de vapor de agua. En amarillo entrada al edómetro, en marrón salida del edómetro y en verde inyección de aire. 52
Figura 3-11: Sección y elementos del edómetro utilizado (Cañavate, 2010). 53
Figura 3-12: Muestra de prueba (410g) sumergida en el DMDCS (1,91 ml) después de reaccionar con el agua desionizada dentro del desecador. 54
Figura 3-13: Primera muestra de ensayo después de ser tratada con DMDCS. Instrumentos utilizados para el tratamiento. 54
Figura 3-14 : Esquema del contacto entre una partícula irregular y las placas de acero del equipo de compresión uniaxial (Carraveta y O'Sullivan (2012)). 55
Figura 3-15 : Planta de las partículas similares escogidas para los ensayos de compresión uniaxial. Derecha: partículas naturales e izquierda: partículas hidrófobas. Numeración empezando en el 1, de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. 56
Figura 3-16 : Partícula colocada en el equipo antes de ser ensayada. 57
Figura 3-17 : Prensa con equipo de compresión uniaxial antes del inicio del ensayo. 57
Figura 3-18: Proceso de tamizado de las gravas calizas. Tamices utilizados: UNE 15 mm y UNE 10 mm. 60
Figura 3-19 : Preparación de la muestra en el equipo. (a) Vista del área de trabajo con el equipo y la muestra, (b) introducción de la muestra en el edómetro, (c) colocación de la placa que transmite la carga uniforme, (d) colocación de la tapa superior con la membrana, (e) montaje del marco con el aparato de toma de medidas. Equipo con comparador y (f) montaje del marco con el aparato de toma de medidas. Equipo con LVDT. 62
Figura 3-20: Trayectorias tensionales. (a) ensayos preliminares, (b) ensayos con material de diámetro máximo igual a 30 mm sin tratar con inundación directa y (c) ensayos análogos a (b) con material tratado. 64
Figura 4-1: Partículas no tratadas en el dispositivo fotográfico. 66

Figura 4-2: Forma de una gota de agua pipeteada encima de una superficie de pizarra antes de ser tratada. 67
Figura 4-3 : Forma de una gota de agua pipeteada encima de una misma superficie de pizarra (a) antes de ser tratada y (b) tras el recubrimiento hidrófobo a base de DMDCS. 67
Figura 4-4: Medición de los ángulos de contacto con AutoCAD 2014 a partir de las fotografías tomadas. 68
Figura 4-5: Ángulos de contacto medidos en distintas partículas. 69
Figura 4-6: Ángulos de contacto de equilibrio calculados con la aproximación de Marmur a partir de los ángulos medidos. 70
Figura 4-7 : Partículas SS6 – SS8 y TS6 – TS8 tras la rotura durante el ensayo de compresión uniaxial entre dos placas de acero. 71
Figura 4-8: Relación desplazamiento – carga de 10 partículas saturadas. En líneas continuas material tratado y en discontinuas material natural. 71
Figura 4-9 : Tensiones en la rotura para las 40 partículas ensayadas (derecha) y medias y desviaciones típicas de cada clase (izquierda). 72
Figura 4-10 : Curvas tensión deformación en escala natural. Ensayos preliminares. 73
Figura 4-11: Curvas tensión deformación en escala semilogarítmica. Ensayos preliminares. 74
Figura 4-12: Granulometrías inicial y finales de los ensayos preliminares (E1P-D15-CD, E2P-D15-ICD y E1CA-D15-CD). 74
Figura 4-13 : (a) Material con granulometría inical antes del ensayo y (b) material tras el ensayo E2P-D15-ICD. 75
Figura 4-14 : Estado de la muestra justo después de la apertura del edómetro. 76
Figura 4-15: Granulometrías inicial y finales de las muestras. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con inundación directa de la muestra. 77
Figura 4-16: (a) Material tras el ensayo E3P-D30-ICDy (b) material con granulometría inicial. 78
Figura 4-17: Curvas granulométricas en escala logarítmica. 78
Figura 4-18: Fotografías de las partículas superficiales de la muestra correspondiente al E2P-D30-CID una vez introducidas al edómetro. (a) Antes del ensayo y (b) después del ensayo. 80
Figura 4-19: Curvas tensión deformación en escala natural. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm e inundación directa. 81
Figura 4-20: Curvas tensión-deformación en escala semilogarítmica. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm e inundación directa. 81
Figura 4-21: Curvas tensión-deformación en escala naturalde las trayectorias con Carga-Inundación-Descarga. Ensayos E1P-D30-CD, E2P-D30-CID y E4PT-D30-CID. 83
Figura 4-22: Curvas tensión-deformación en escala natural de las trayectorias con Inundación-Carga-Descarga. Ensayos E3P-D30-ICD y E5PT-D30-ICD. 83
Figura 4-23: Comparativa entre los resultados experimentales con material natural y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica. 84

Figura 4-24: Comparativa entre los resultados experimentales con material con recubrimiento hidrófobo y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica. 85
Figura 4-25: Superficies de fluencia para material no tratado con inundación directa. 85
Figura 4-26: Fotografías de las partículas superficiales de la muestra correspondiente al E7PT-D30-SCD una vez introducidas al edómetro. (a) Antes del ensayo y (b) después del ensayo. 87
Figura 4-27: Granulometrías inicial y finales de las muestras. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con saturación con vapor de agua. 88
Figura 4-28 : Curvas granulométricas en escala logarítmica. 88
Figura 4-29: Curvas tensión deformación en escala natural. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm y saturación con vapor de agua. 89
Figura 4-30: Curvas tensión deformación en escala semilogarítmica. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm y saturación con vapor de agua. 90
Figura 4-31 : Comparativa de los parámetros básicos del modelo constitutivo entre el material natural y el material tratado. 91
Figura 4-32: Comparativa entre los resultados experimentales con material natural y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica. 92
Figura 4-33 : Comparativa entre los resultados experimentales con material con recubrimiento hidrófobo y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica. 93
Figura 4-34: Comparativa entre las superficies de fluencia correspondientes a la pizarra natural y la pizarra hidrófoba. 93
Figura 4-35 : Curvas deformación-tiempo del ensayo E5PT-D30-ICD. 94
Figura 4-36: Compresibilidad dependiente del tiempo .Ensayos preliminares. 95
Figura 4-37 : Compresibilidad dependiente del tiempo. (a) Trayectorias en seco y (b) trayectorias con saturación inicial. 96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Propiedades de la pizarra del río Pancrudo. 44
Tabla 3-2: Propiedades de la grava caliza del Garraf..... 46
Tabla 3-3: Comparativa de la toxicidad de los componentes químicos de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008. 47
Tabla 3-4: Ensayos edométricos realizados. Características de sus equipos y carga de inundación..... 65
Tabla 4-1 : Media y desviación típica del conjunto de ángulos de contacto medidos para cada conjunto de partículas. 69
Tabla 4-10 : Tensiones de rotura clasificadas en 4 categorías según las condiciones de la muestra..... 72
Tabla 4-2: Parámetros de rotura de partículas. Ensayos preliminares. 74
Tabla 4-3: Parámetros de rotura de partículas. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con inundación directa de la muestra. 77
Tabla 4-4: Dimensión fractal de las muestras tras los ensayos..... 79
Tabla 4-5 : Parámetros del modelo constitutivo determinados a partir de los resultados experimentales. 82
Tabla 4-6 : Parámetros de rotura de partículas. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con saturación con vapor de agua..... 88
Tabla 4-7 : Dimensión fractal de las muestras tras los ensayos..... 89
Tabla 4-9 : Parámetros del modelo constitutivo determinados a partir de los resultados experimentales. 91

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La escollera consiste en un material formado por bloques pétreos con formas prismáticas y superficies rugosas, obtenidos generalmente mediante voladura. En el campo de la ingeniería civil se ha utilizado ampliamente en obras hidráulicas y martítimas o bien en la construcción de pedraplenes para obras en carreteras o líneas ferroviarias de alta velocidad. Su utilización a lo largo de los años ha permitido obtener un registro extenso de información sobre el comportamiento observado de dichas estructuras. Estas observaciones han servido de base para correlacionar los episodios puntuales de colapso de las escolleras con la presencia de agua en la estructura, tras fuertes lluvias por ejemplo. El hecho que la escollera sea un material drenante debido a sus características granulométricas, significa que rápidamente se alcanzarán condiciones no saturadas o parcialmente saturadas. La gran influencia del agua en la compresibilidad de las escolleras junto con el colapso durante su saturación, han sido las principales motivaciones para estudiar la posibilidad de desarrollar un recubrimiento hidrófobo que permita proteger los bloques frente al agente erosivo del agua.

Los numerosos estudios realizados en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB) han contribuido a la caracterización del comportamiento de las escolleras. Destaca el trabajo de Oldecop y Alonso (2001) en que establecieron un modelo constitutivo elastoplástico que incluye la saturación parcial de la estructura con la introducción de la succión en la formulación del modelo. El presente trabajo pretende contribuir en la línea de investigaciones sobre el comportamiento de las escolleras intentando desarrollar un tratamiento que permita establecer un recubrimiento hidrófobo sobre las partículas que evite el colapso y la deformación causada por el agua.

1.2. OBJETIVOS

Los numerosos estudios realizados permiten destacar la gran problemática en la compresibilidad de escolleras que supone su estado en condiciones saturadas. El presente trabajo tiene como principal motivación estudiar la influencia de la aplicación de un tratamiento hidrófobo en escolleras. Siguiendo esta línea los objetivos fijados han sido:

- Analizar el fenómeno de la hidrofobicidad y presentar un estado del arte amplio de las aplicaciones de esta característica en suelos.

- Examinar los productos existentes y las características de los tratamientos ya desarrollados en la literatura.

- Formar un recubrimiento hidrófobo estable en materiales granulares con tamaños ($D_{máx}$= 30 mm) significativamente superiores a los materiales descritos en la literatura ($D_{máx}$< 2mm).

- Estudiar la contribución del tratamiento hidrófobo en la compresibilidad de escolleras. Simulación del contacto entre dos partículas con ensayos de compresión uniaxial entre placas de acero junto con la simulación de estructuras de escollera con ensayos edométricos en un equipo Rowe de ϕ=150 mm.

- Cuantificar los resultados y simular numéricamente los ensayos edométricos realizados con el modelo constitutivo propuesto por Oldecop y Alonso (2001).

1.3. CONTENIDOS

La tesina se organiza en seis capítulos donde se detallan tanto los conceptos teóricos como el desarrollo experimental y los resultados obtenidos con el programa de ensayos realizado.

Primeramente, en el presente capítulo, se presenta al lector una introducción de las escolleras y su gran empleo en ingeniería civil así como la gran influencia del agua en su comportamiento, principal hecho que motiva la realización del presente trabajo. Además, se citan los objetivos y cuestiones que se plantean resolver.

El segundo capítulo sirve de marco para presentar los conceptos teóricos relacionados tanto con las escolleras como con la hidrofobicidad. Des del punto de vista de las escolleras se describen los principales fenómenos de rotura de partículas, en especial la propagación de grietas, junto con el modelo constitutivo elastoplástico utilizado que fue propuesto por Oldecop y Alonso (2001). A continuación, se introduce la teoría general de la hidrofobicidad y más precisamente, en suelos. Es en este capítulo donde se citan los tratamientos existentes en la literatura para crear superficies hidrófobas artificiales. Parte de estos tratamientos no han sido probados en suelos mientras que los que sí han sido ensayados en suelos, se trata en todos los casos de suelos finos formados por arenas, limos y arcillas.

En el capítulo 3 se explica las características del material empleado en los ensayos así como los equipos utilizados. Es también en este capítulo que se describe el Dimethyldiclorosilano (DMDCS), agente hidrófobo escogido para crear el recubrimiento hidrófobo en las partículas de escollera. Todos los procedimientos establecidos son detallados en el tercer capítulo. Referente a los ensayos llevados a cabo, se realizaron ensayos de compresión uniaxial de partículas irregulares de roca entre placas de acero para simular a nivel individual las fuerzas de contacto entre partículas. Para analizar la compresibilidad de las escolleras de forma global se utilizó un edómetro Rowe con diámetro Φ= 150 mm.

En el capítulo 4 se sintetizan los resultados numéricos obtenidos en el programa experimental llevado a cabo. Por un lado, se estudia la eficiencia del tratamiento hidrófobo analizando los ángulos de contacto obtenidos en las partículas tratadas. Una vez comprobada el funcionamiento del recubrimiento hidrófobo, se detallan los resultados de los ensayos descritos en el capítulo anterior realizados idénticamente con pizarra natural y con material tratado. Estos resultados permiten calcular una serie de índices que sirven para evaluar la compresibilidad de la escollera y establecer una comparativa y determinar así la contribución del agente hidrófobo. Por último, a partir

de los resultados de los ensayos edométricos, se implementó el modelo constitutivo para escolleras propuesto por Oldecop y Alonso (2001).

Para finalizar, se resumen en el capítulo 5 las principales conclusiones e ideas desarrolladas a lo largo del trabajo poniendo énfasis en los fenómenos observados en la pizarra tratada con DMDCS.

Por último, el capítulo 6 consiste en una enumeración de las fuentes bibliográficas consultadas a lo largo del trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. COLAPSABILIDAD Y DEFORMABILIDAD DE ESCOLLERAS

2.1.1. OBSERVACIONES DEL COMPORTAMIENTO EN ESCOLLERAS

Las escolleras son utilizadas como material de construcción especialmente en la construcción de pedraplenes y obras hidráulicas (presas y diques). En el caso de las obras hidráulicas, el contacto directo con la lámina de agua implica que la estructura esté en un medio parcialmente saturado.

En materiales más finos, el comportamiento de la estructura está controlado por el efecto de la capilaridad. La succión matricial, definida por las características del menisco, ayuda a mantener estable las partículas que forman el suelo. Como consecuencia, el colapso que aparece al mojar una arena, por ejemplo, puede explicarse con la desaparición de dichas fuerzas intersticiales. Si incrementamos el tamaño de las partículas, el fenómeno de la capilaridad ya no explica la deformación del material. Esto se debe a que en este caso las fuerzas asociadas a los meniscos (Fw) son despreciables comparado con las fuerzas de peso propio de la propia estructura (Wp). Gili (1988) expresó de forma teórica el valor de las fuerzas Fw en función del tamaño de partícula y su relación con el peso propio de dicho tamaño tal y como muestra la siguiente figura.

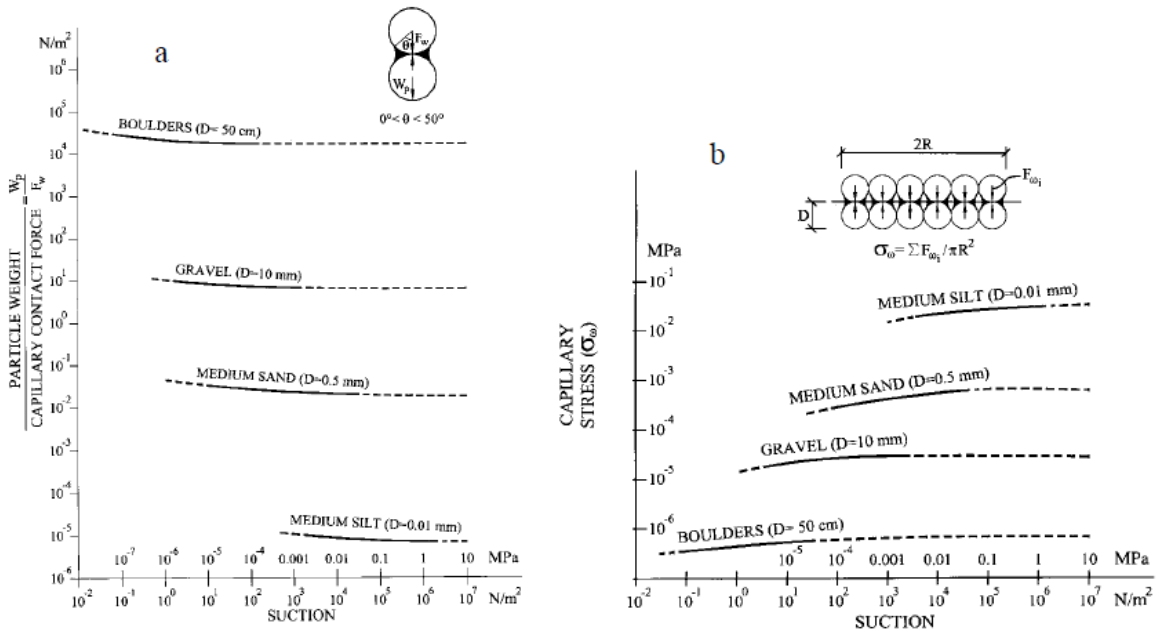


Figura 2-1: Modelo capilar simplificado en esferas. (a) Fuerza de atracción entre dos esferas normalizada y (b) fuerzas capilares en distintos tamaños de granos. (Alonso basándose en Gili, 1988).

Ya desde los años 60, fruto a las observaciones de las deformaciones de varias presas se constató que el comportamiento de la escollera estaba directamente relacionado con la rotura de las partículas junto con la presencia de agua. Terzaghi (1960) sugirió que bajo cargas de compresión las partículas se rompen y se reacomodan hasta formar una matriz estable.

Por un lado, distintos trabajos realizados mostraron un comportamiento con una clara dependencia temporal. Estos estudios fueron motivados por las observaciones de los desplazamientos en función del tiempo. La gran mayoría de presas con presencia de taludes en escollera continúan activas a nivel de asientos decenas de años tras su construcción. Sowers et al. (1965) estudió las medidas registradas y observó una relación semilogarítmica en el tiempo.

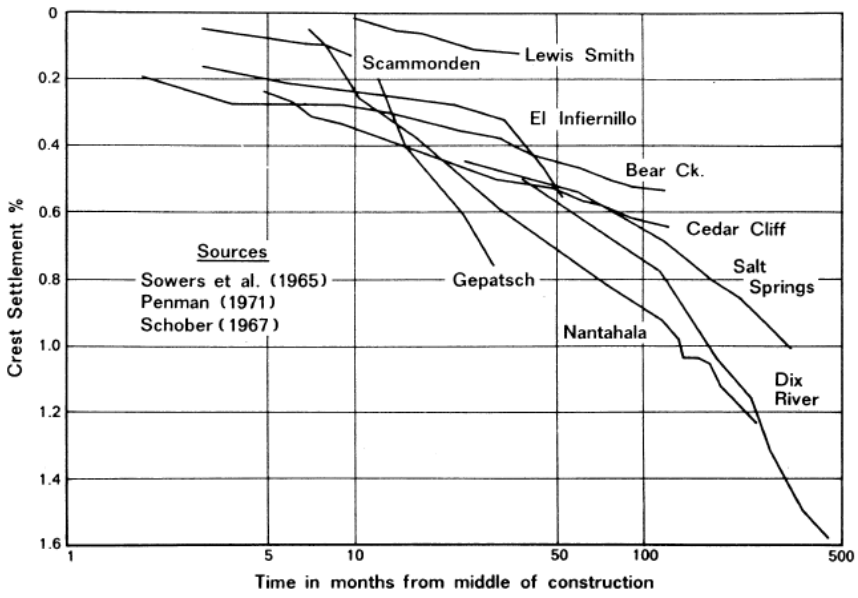


Figura 2-2: Dependencia temporal de los asientos registrados en diferentes presas. (Parkin, 1977).

Esta correlación puede expresarse como en la ecuación 1, donde α toma valores entre 0,2 y 0,7 con una mayor tendencia en los extremos del intervalo. A pesar de las observaciones, no se consiguieron interpretar los valores de α.

$$\Delta H = \alpha \log (t_1 - t_2) \quad (1)$$

Por otro lado, el segundo factor relevante en la compresibilidad de la escollera es la presencia de agua. Esta presencia conlleva una aceleración de la rotura de las partículas. El fenómeno se observa directamente puesto que es durante la puesta en carga cuando se observa un mayor colapso. El mismo comportamiento aparece durante episodios de lluvias intensas. Las figuras siguientes muestran la correlación entre la intensidad de lluvia y las deformaciones importantes de la presa de Dix y de la presa de Beliche.

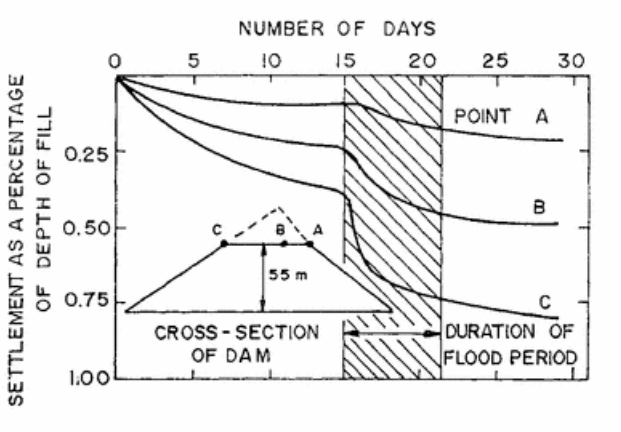


Figura 2-3 : Asientos de la presa de Dix durante un periodo de inundaciones. (Nobari y Duncan, 1972).

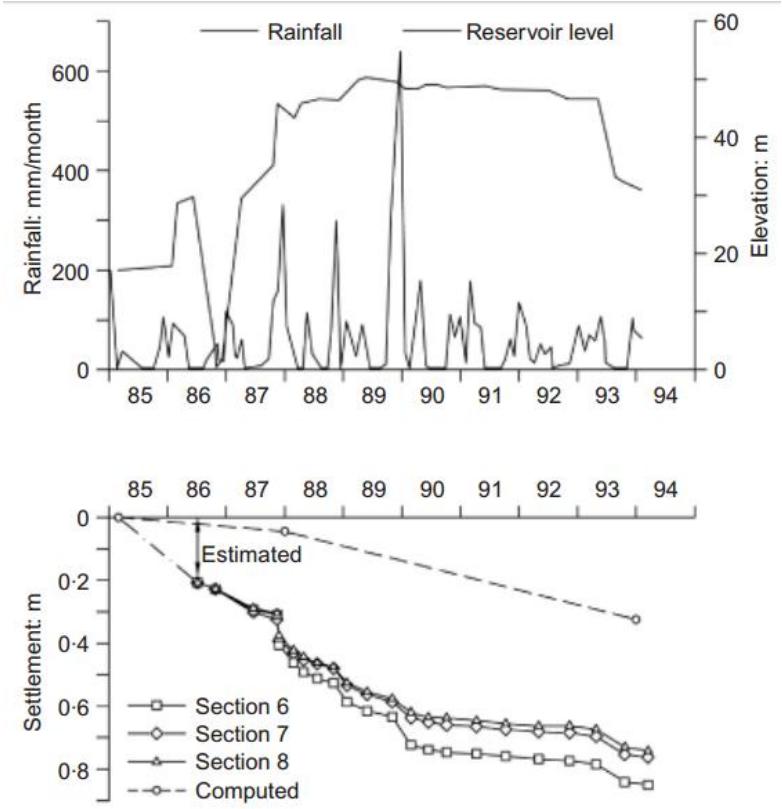


Figura 2-4: Presa de Beliche. (a) Intensidades de lluvia y nivel de embalse y (b) asientos verticales medidos y estimados por Naylor et al. (1997). (Alonso, Olivella y Pinyol, 2005).

Posteriormente, Oldecop y Alonso (2001) relacionaron las deformaciones dependientes del tiempo y el colapso con el fenómeno de rotura de partículas. El modelo propuesto, basado en un mecanismo de propagación de fractura, permite explicar físicamente y de manera consistente tanto las deformaciones temporales como el colapso y su dependencia directa con la acción del agua.

2.1.2. ROTURA DE PARTÍCULAS

Los primeros trabajos experimentales llevados a cabo (Sowers et al. (1965), Fumagalli (1969), Marachi et al. (1969) and Marsal (1973), entre otros) mostraron empíricamente la influencia de la rotura de partículas en la deformabilidad de la escollera. Durante la realización de los ensayos las deformaciones aparecían junto con el cambio de la

granulometría antes y después del ensayo. Algunos de estos autores estudiaron también el comportamiento de una sola partícula. Para ello se llevaron a cabo dos tipologías de ensayos: compresión de una partícula irregular de roca entre dos placas de acero (Marsal, 1973; Lee, 1992) y presión de una esquina (angulosa o redondeada) contra una superficie metálica (Sowers et al., 1965; Clements, 1981). En la figura 2-5 se muestran el procedimiento y los resultados obtenidos por Lee (1992).

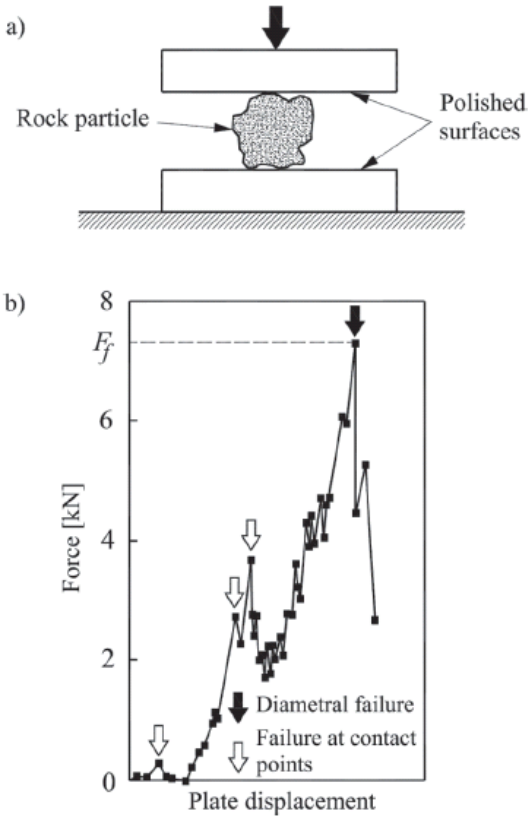


Figura 2-5: Ensayos de compresión de una partícula irregular de roca entre dos placas de acero (Oldecop, 2013, basándose en Lee (1992)). (a) Esquema de ensayo y (b) relación típica entre la fuerza aplicada y el desplazamiento.

El mecanismo de rotura presenta tres etapas bien diferenciadas. En la primera la zona de contacto entre la partícula de roca y la placa se tritura. Como consecuencia, el área de contacto aumenta a medida que se aumenta la carga. Seguidamente, aparecen fracturas en los alrededores del área de contacto. Por último, la partícula se fractura en uno o más planos.

Según Hardin (1985), los parámetros que afectan la rotura de las partículas de un suelo bajo tensión son los siguientes:

1. Distribución granulométrica
2. Forma de la partícula
3. Tensiones efectivas
4. Trayectoria tensional
5. Índice de poros
6. Dureza de las partículas
7. Presencia o ausencia de agua

La influencia del tamaño y la distribución granulométrica ha sido analizada en múltiples trabajos. Desde un punto de vista estadístico, un mayor tamaño de roca implica una mayor probabilidad de encontrar grietas en la partícula.

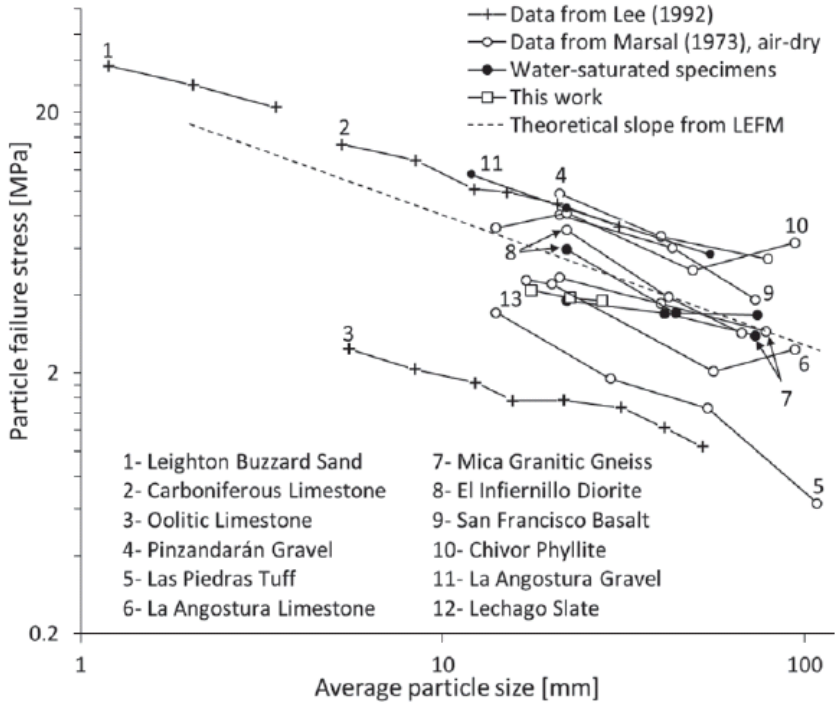


Figura 2-6: Variación de la resistencia a la rotura en función del tamaño de partícula para diferentes gravas y escolleras (Oldecop, 2013).

Ramon (2008) estudió la influencia de la granulometría en ensayos edométricos. Los resultados obtenidos muestran que en muestras con el mismo grado de uniformidad, pero con distintos valores de D_{50}, la compresibilidad aumenta con el tamaño de partícula. Por otro lado, muestras más uniformes tiene un comportamiento más compresible y con un mayor colapso que otras muestras mejor graduadas, ambas con un mismo D_{50}. En este último tipo de granulometrías las partículas muestran un número de coordinación más alto (equivalente a un mayor número de contactos). Este hecho conlleva a una menor compresibilidad puesto que las tensiones efectivas se dividen entre los contactos.

McDowell y Bolton (1996) observaron que en una estructura de escollera solo los tamaños menores sufrían rotura cuando se incrementaba la carga. Como resultado, las granulometrías uniformes van fracturándose hasta alcanzar estructuras más estables. La estabilidad de una granulometría puede calcularse con la dimensión fractal (D) de esta. Fruto de dichas observaciones, McDowell y Bolton expresaron la dimensión fractal como:

$$\emptyset_{L>d} = \frac{N(L>d)}{N(L>ds)} = \left(\frac{d}{ds}\right)^{-D} \qquad (2)$$

Donde $\emptyset_{L>d}$ corresponde a la fracción de partículas con tamaño superior a d, ds el diámetro mínimo de partícula de la muestra y D la dimensión fractal. En granos tridimensionales se espera un valor de D comprendido entre 0 y 3 tal y como lo indican Palmer y Sanderson. En estudios posteriores, diversos autores alcanzan valores comprendidos entre 2 y 3. Es el caso de McDowell et al. (2013) quien analizó el valor de la dimensión fractal en función de la carga aplicada llegando a valores constantes con D igual a 2,5.

El efecto de la forma de la partícula en la rotura fue estudiado presionando esquinas de roca (angulosas o redondeadas) contra superficies resistentes y lisas, normalmente metálicas. Clements (1981) llevó a cabo esta segunda tipología de ensayos. Según los ángulos de las puntas y la cargas a la cual rompían sugirió que las partículas angulosas son más propensas a romper que aquellas redondeadas.

Cañavate (2010) se centró en comparar el comportamiento de muestras formadas por partículas lajosas (baja esfericidad) y otras muestras con partículas no lajosas (alta esfericidad) en su tesis de máster. Gracias al procesamiento de imágenes realizado se desprende que las partículas del material inicialmente lajoso tienen una clara tendencia a pasar a adoptar una forma no lajosa. Por el contrario, en el material inicialmente no lajoso el contenido de lajas se mantiene constante a lo largo del ensayo. Asimismo, se observó que la rotura de partículas en las muestras lajosas es mucho mayor que en las no lajosas.

Por otra parte, fruto de los ensayos del mismo autor, se apreció que la configuración final de las muestras de un mismo tipo era idéntica, independientemente de las trayectorias tensionales seguidas, para un mismo punto final tensión-succión. En otras palabras, las variables macroscópicas registradas: deformaciones, granulometría, índice de lajas y parámetros de rotura de partículas para cada tipo de material alcanzaban los mismos valores independientemente del camino seguido.

2.1.3. APERTURA Y PROPAGACIÓN DE FISURAS

Para explicar la rotura de la escollera es necesario enfocar el problema según la mecánica de fractura. Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, la compresibilidad de la escollera puede explicarse con la propagación de fisuras en las partículas y la influencia del agua en este fenómeno. A continuación, se van a exponer los principios de propagación de fisuras y, más concretamente, la importancia de un agente ambiental, como es el agua, para que este fenómeno se desarrolle de manera catastrófica.

En mecánica de fractura se estudia la propagación de grietas, así como los diferentes factores que influyen en la formación y crecimiento de estas. Irwin introdujo un enfoque local del estudio de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) a partir de la evaluación del estado tensional en el extremo de la fisura. Para ello introdujo los factores de intensidad de tensiones (K_L) quienes indican cuanto de grandes son las tensiones cerca de la grieta. La expresión de estos factores depende de la geometría del cuerpo, de la longitud de la grieta y del tipo de carga aplicada. Broek (1985) propuso la siguiente expresión general.

$$K_L = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \qquad (3)$$

σ es la tensión aplicada lejos de la grieta, a la longitud de la grieta y β un factor adimensional en función de la geometría del cuerpo. Este último factor depende de la relación entre las dimensiones de la grieta y las dimensiones del cuerpo y puede ser obtenido en manuales (Murakami, 1987).

Por otro lado, el subíndice L indica el modo de fractura. I para el modo de apertura, II para el modo de cizallamiento y III para el modo de rasgado.

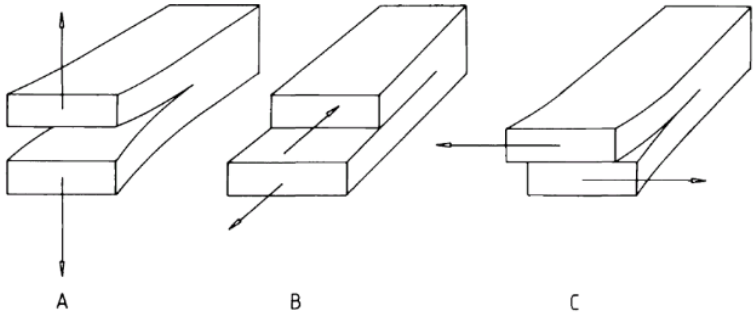


Figura 2-7 : Modos de fractura. A modo I (modo de apertura), B modo II (modo de cizallamiento) y C modo III (modo de rasgado) (Atkinson, 1987).

Para que una fisura empiece a propagarse, el factor de intensidad debe superar un valor crítico llamado tenacidad de la fractura (K_{LC}). Este depende del material y del modo de fractura y puede ser calculado de forma experimental. Cuando las tensiones en los alrededores de la grieta son inferiores a la tenacidad de la fractura ($KL < K_{LC}$) esta permanece estable. Por el contrario, cuando las tensiones son superiores ($KL > K_{LC}$) la fisura se abre.

Pese a que la mecánica de fractura clásica postula que una grieta se propaga cuando el factor de concentración de tensiones alcanza un valor crítico (K_{LC}), se ha observado que la grieta también puede propagarse con valores inferiores a la tenacidad de la fractura. Este fenómeno se conoce como crecimiento subcrítico de fisuras y fue descrito por Atkinson (Atkinson (1982), Atkinson (1984) y Atkinson y Meredith (1987)). En sus trabajos observó que el crecimiento subcrítico de fisuras puede ser causado por diferentes mecanismos como la fatiga u otros algunos de los cuales dependen del entorno químico. La corrosión por tensión es el caso más importante cuando se trata de entornos químicos agresivos. Este fenómeno implica el reblandecimiento del extremo de la fisura causado por la acción química de un agente ambiental, como es el caso del agua, facilitando así la propagación de la fisura.

En investigaciones recientes las líneas de trabajo se han centrado en materiales geológicos precisos ya que en cada material se puede explicar físicamente el fenómeno según la estructura de este. Para el caso de las rocas ígneas, se ha demostrado que la presencia del agua tiene un papel fundamental en el crecimiento subcrítico de fisuras. Nara et al. (2011) hace referencia a varios autores en cuyos estudios se presentaron resultados en donde la velocidad de propagación de fisura es muy superior en agua que en aire. En agua, el problema se presenta bajo un sistema acoplado con la temperatura; la velocidad crece con el aumento de temperaturas. En aire, la velocidad crece con el incremento de humedad relativa o de la presión de vapor de agua.

En definitiva, el crecimiento subcrítico por corrosión por tensión ofrece un marco coherente para explicar el colapso de las estructuras en escollera bajo succiones bajas. La presencia de agua en las grietas debilita el material haciendo que rompa a valores inferiores de K_L que para el mismo material sin corroer. Existe una relación empírica (Wiederhorn et al.) entre la velocidad de propagación de fractura (V) y el factor de intensidad de tensiones (K) para una humedad relativa dada (HR).

$$V = V_0(HR)exp[(-E^* + bK)/RT] \quad (4)$$

En la ecuación (4), R corresponde a la constante universal de los gases ideales, T a la temperatura absoluta y V_0, E y b son constantes determinadas a partir del ajuste de los datos experimentales.

La figura 2-8 muestra la evolución de la velocidad de propagación de fractura en función del factor de intensidad K. Vemos que existen tres regiones bien marcadas cuya dinámica es distinta. El comportamiento en negrita de la región II sigue la ecuación (4) y está controlado por la velocidad de reacción en el extremo de la grieta. De hecho, se puede considerar la humedad relativa como una medida del potencial químico del agente corrosivo, agua en este caso preciso. Esta afirmación surge del principio de equilibrio termodinámico quien implica que tanto el estado gas como el estado líquido, si están en equilibrio, tendrán el mismo potencial químico.

En ciertos materiales, al final del comportamiento lineal dominante en la región II, aparece una zona con una velocidad constante controlada por la velocidad de transporte de especies reactivas hacia el extremo de la grieta. Sin embargo, este comportamiento se observa con poca frecuencia en la gran mayoría de materiales (Atkinson, 1984). Cuando K se acerca al valor de la tenacidad de la fractura K_C, la velocidad aumenta rápidamente lo que conlleva a una rotura catastrófica de la partícula. El crecimiento de la fisura en la región III está controlado por la ruptura mecánica y es independiente del entorno químico. Por otra parte, se asume la existencia de un límite inferior K_0 en el cual no existe la propagación de fisuras incluso con la presencia del fenómeno de corrosión por tensión. El valor de este parámetro es función de las propiedades de fractura del material, así como las características del ambiente. Es probable que K_0 corresponda a una pequeña fracción (10-20%) de K_C aunque todavía no se haya confirmado de forma experimental.

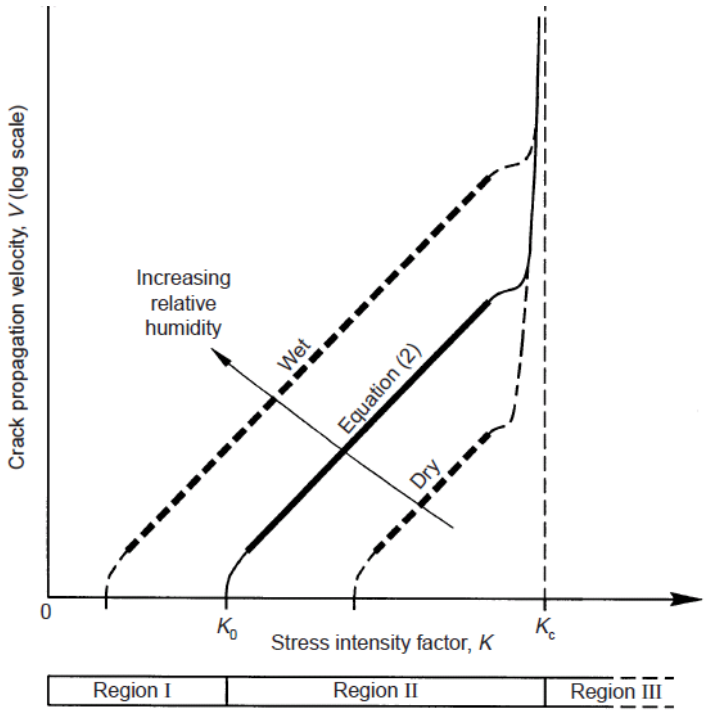


Figura 2-8: Cinética del crecimiento subcrítico de fisuras (Oldecop y Alonso, 2001).

Una vez analizada la propagación de una fisura en un cuerpo, Oldecop y Alonso (2001) extrapolaron este comportamiento en estructuras de escollera. Si consideramos que una escollera esta en equilibrio, no se observan deformaciones en el tiempo, es porque los factores K de sus fracturas tienen valores inferiores al valor límite teórico K_0 (región I). Si aplicamos una carga el factor K se incrementará según la ecuación (4). Ahora ciertas fisuras se encontrarán en la región II ($K_0 < K < K_C$) lo que conlleva la propagación de la grieta a una velocidad V. A medida que la grieta se abre, la longitud de esta (a) también aumentará. Como resultado de la ecuación (4), el factor de intensidad de tensiones se incrementa progresivamente. Si el aumento de tensiones o la apertura de las grietas es tal que K se acerca a K_C, las partículas se romperán de manera instantánea. Por otro lado, si modificamos la humedad relativa de la muestra, inundándola, por ejemplo, veremos que la curva del crecimiento subcrítico de fisuras se ve desplazada hacia la izquierda (Figura 2-8). En este caso, es posible que ciertas fisuras que previamente pertenecían a la región I ahora se encuentren en la región II y, como consecuencia, empiecen a propagarse. Además, las fisuras inicialmente activas van a incrementada su velocidad V. La rotura de las partículas conllevara un colapso observable a partir de las deformaciones de la estructura. Como consecuencia, la nueva estructura, con nuevas partículas de tamaños inferiores, se reacomodará llenando los poros hasta alcanzar un estado de equilibrio.

2.1.4. PARÁMETROS DE LA ROTURA DE PARTÍCULAS

La compresibilidad en la escollera aparece a causa de la rotura de las partículas y su posterior reacomodación cuando está sujeta a cargas de compresión. Este fenómeno se demostró en distintos ensayos llevados a cabo por Marsal (1967) puesto que las curvas granulométricas se vieron modificadas después de la aplicación de los esfuerzos. Fruto de estas observaciones se definió el parámetro de rotura de Marsal (Bg). Si calculamos la diferencia entre el porcentaje retenido entre dos tamices antes y después del ensayo y sumamos los valores positivos de esta serie de valores obtenemos el porcentaje en peso de las partículas que han sufrido fragmentación. Este concepto se expresa mediante las ecuaciones siguientes.

$$\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf} \qquad (5a)$$

$$B_g = \sum \Delta W_{k\ positivos} \qquad (5b)$$

El parámetro de rotura de Marsal (Bg) tomará valores entre 0 (no se rompe ninguna partícula) y un valor límite teórico de 100% que corresponde al caso en que todas las partículas se rompen hasta tamaños inferiores al menor tamiz utilizado.

Otro parámetro también utilizado es el propuesto por Hardin (1985). Este evalúa la rotura total en función del potencial de rotura de la granulometría inicial de la muestra. Así pues, el potencial de rotura (Bp) se define como el área comprendida entre la curva granulométrica inicial y el tamiz ASTM nº200 (luz de 0,075 mm). Se toma como límite este tamaño de grano puesto que la fractura en partículas de tamaños inferiores es ya limitada. Por otra parte, la rotura total (Bt) determina la rotura en la muestra. Se calcula como el área comprendida entre las curvas granulométricas inicial y final. Finalmente, el parámetro de Hardin (Br), comprendido entre 0 y 1, se define como el cociente:

$$B_r = B_t / B_p \qquad (6)$$

La siguiente figura sintetiza gráficamente ambos parámetros de rotura.

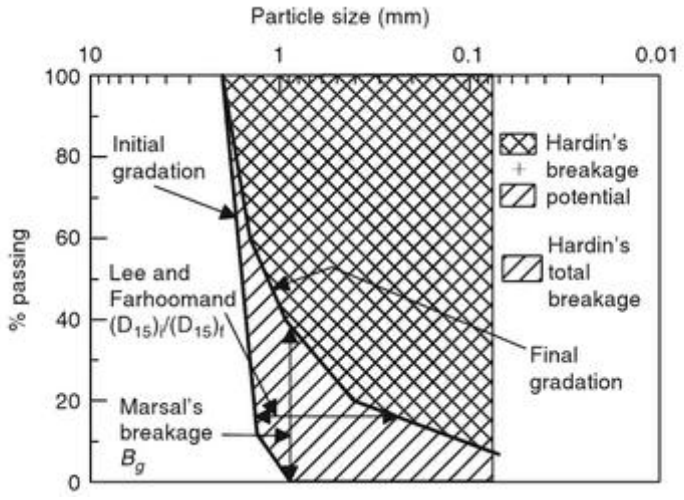


Figura 2-9: Definición de los diferentes parámetros de rotura de partículas (Indraratna basado en Lade et al., 1996).

2.2. MODELO ELASTOPLÁSTICO EDOMÉTRICO PARA ESCOLLERAS

2.2.1. MODELO CONCEPTUAL

Después de haber definido la rotura de las partículas a partir de la teoría clásica de mecánica de fractura, introduciendo el factor de intensidad de tensiones (K_L), junto con el crecimiento subcrítico de fisuras (velocidad de propagación de las fisuras (V)) se procederá a relacionar los distintos fenómenos descritos con el comportamiento de la escollera. Para ello nos basamos en el modelo conceptual propuesto por Oldecop y Alonso. Este modelo incluye también el efecto del agua en la rotura, observable en estructuras como las presas. En el apartado 2.1.3 se ha definido la propagación subcrítica de fisuras y sus causantes. Este fenómeno explica de manera coherente tanto la deformación dependiente del tiempo como el colapso. Por un lado, bajo una tensión aplicada constante, es probable que la rotura de las partículas no se produzca de forma instantánea (K→Kc) sino que las grietas presentes en los granos se vayan abriendo (K < Kc) a una velocidad V creciente con la apertura de la grieta (a). Como resultado se observa una rotura progresiva de la estructura (deformaciones dependientes del tiempo). Por otro lado, la presencia del agua agrava el problema ya que su potencial químico debilita el extremo de la apertura. Según la figura 2-8, una configuración inicialmente en equilibrio ($K<K_0$) puede empezar a deformarse sin necesidad de aumentar la carga. Para ello es necesario desplazar la curva K-V con la variación de la humedad relativa de la muestra. Según el punto inicial y el desplazamiento de la región I y región II las deformaciones apreciadas pueden ser medias (con un inicio del crecimiento de las fisuras) o bien importantes con unas deformaciones catastróficas sin aumento de la carga (colapso) en el caso en que las nuevas velocidades V sean suficientemente altas.

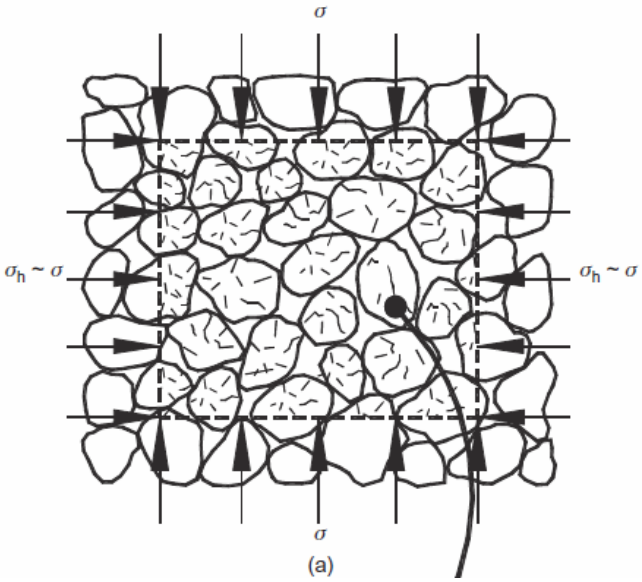
Ahora, si tenemos en cuenta el comportamiento del conjunto de partículas de escollera, con múltiples grietas cada una con un factor de intensidad K, en función de la tensión aplicada, observamos cuatro etapas.

Durante un corto estado inicial bajo un estado tensional de bajas tensiones, la deformación es causada por la reacomodación de las partículas. En este estado inicial, bajo un umbral de carga suficientemente bajo, no aparece el colapso de la estructura en caso de saturación de la muestra. Esta no dependencia del agua para muy bajas tensiones ocurre cuando el factor de intensidad K es inferior al límite $K_{0.}$ En este caso no se producirá la rotura de las partículas, sino que las deformaciones (hinchamiento/retracción) vienen causadas por el movimiento de las partículas.

Si aumentamos la tensión, las partículas empiezan a romperse. A nivel de la estructura, este hecho se traduce en un aumento del índice de compresibilidad. Dicho estado corresponde a la plastificación clástica (clastic yielding).

A medida que aumentamos la tensión observamos linealidad en escala semilogarítmica de la tensión-deformación en las líneas de consolidación normal. Simultáneamente, las partículas con tamaños menores se romperán con mayor facilidad dado que su número de coordinación es menor y, en consecuencia, mayor es la concentración de tensiones. La rotura de las partículas menores continuará produciéndose, dando como resultado una distribución granulométrica fractal. Este estado corresponde al endurecimiento clástico (clastic hardening) y fue observado en un primer instante por McDowell & Bolton (1998).

Por otro lado, los resultados experimentales analizados durante los diferentes programas de ensayos llevados a cabo permitieron observar la existencia de un comportamiento de fluencia en las escolleras. Esta dependencia temporal del la deformabilidad de las estructuras en escollera se puede explicar a partir de un proceso de dos etapas. Una vez definido el marco conceptual del fenómeno de propagación subcrítica de fisuras se puede describir analíticamente la evolución de la apertura de una grieta.



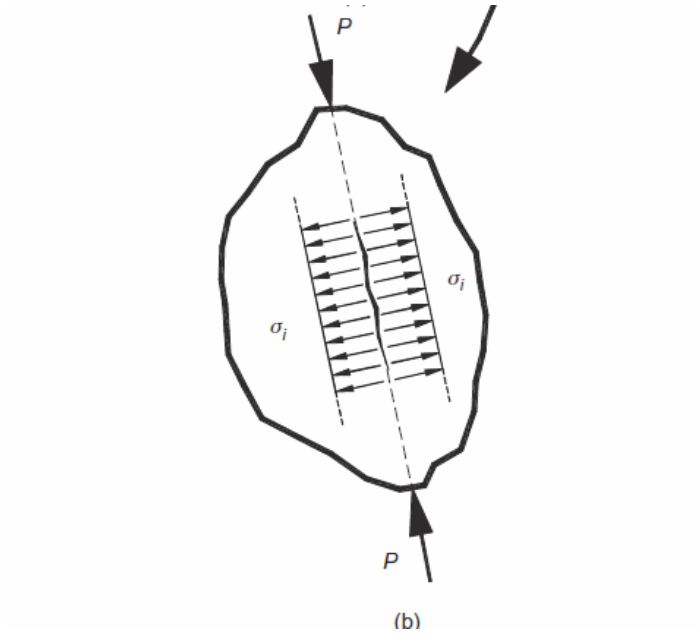


Figura 2-10: (a) Estructura de escollera formada por múltiples partículas con fisuras y (b) partícula de roca sujeta a fuerzas de contacto (Oldecop y Alonso, 2007).

Oldecop y Alonso (2007) propusieron un modelo simple, a nivel de la geometría de la partícula, para poder desarrollar analíticamente su comportamiento en función del factor de intensidad de tensiones y de la velocidad de propagación. Este modelo considera que la zona interna de la partícula está sometida a altas tracciones y que es en su interior donde se forman las grietas que posteriormente se van a propagar desarrollando así una fractura diametral.

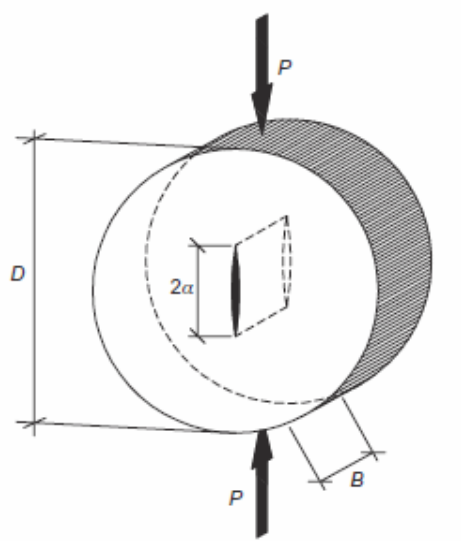


Figura 2-11: Modelo analítico desarrollado para el estudio de la deformabilidad de la escollera en función del tiempo. (Oldecop y Alonso, 2007).

Los resultados obtenidos consisten en que, en un primer instante, bajo una misma carga, las grietas se abren lentamente. A medida que la apertura de la grieta va creciendo, el factor de intensidad K va aumentando hasta un punto crítico en que la propagación se dispara y, como consecuencia, la partícula se rompe. Es por estos dos

fenómenos que se puede explicar el deformabilidad diferida en el tiempo observada en escolleras, fruto de la acumulación de roturas de las partículas que la forman.

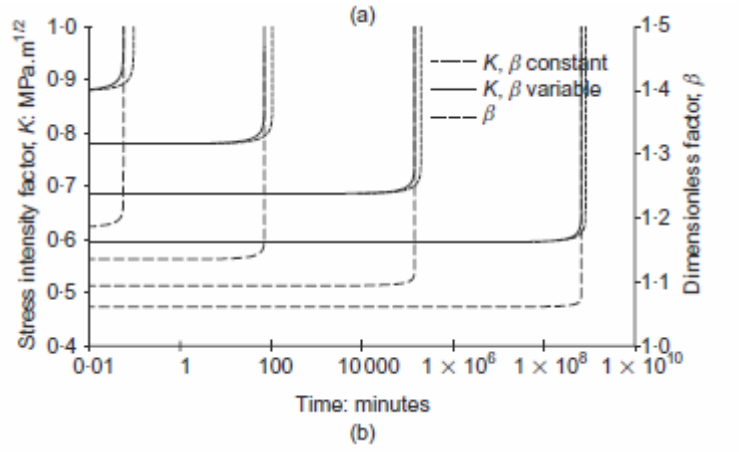


Figura 2-12: Evolución del factor de intensidad de tensiones (K) para diferentes apeturas iniciales de grieta bajo una tensión constante e igual a 5 MPa. Resultados analíticos del modelo propuesto (Odecop y Alonso, 2007).

La formulación desarrollada muestra que el tiempo necesario hasta la rotura depende substancialmente de la apertura de grieta inicial y sorprendentemente, no del tamaño inicial de la partícula. Esta relación se traduce también en una relación directa entre el factor de intensidad de tensiones inicial y el tiempo de rotura.

$$t \propto \frac{1}{V} \propto \frac{1}{K^n} \propto \frac{1}{a^{n/2}} \qquad (7)$$

De la ecuación anterior se puede extraer que para pequeños cambios en la apertura inicial se obtienen tiempos de varios órdenes de magnitud.

El modelo analítico desarrollado fue motivado por las observaciones de los resultados experimentales obtenidos en los distintos programas anteriores. Las deformaciones registradas durante las distintas etapas de carga en los ensayos edométricos parecen indicar la existencia de una relación única entre la deformación, la tensión, la succión y el tiempo para deformaciones bajo carga constante a largo plazo. Por un lado, dicha relación puede describirse como una relación lineal entre la deformación y el tiempo en escala logarítmica. Por otro lado, se dedujo que el índice de compresibilidad dependiente del tiempo (λ^t) y el coeficiente de compresibilidad (λ) siguen una relación similar en función de la succión y de la tensión. De hecho, el coeficiente entre ambos permanece constante y se puede relacionar con la correlación propuesta por Mesri et al. (1990) entre el coeficiente de compresibilidad secundaria (C_∞) y el índice de compresión (C_c). El valor de la constante es inversamente proporcional al parámetro n de la ley de Charles para corrosión bajo tensión quien a su vez es un parámetro descriptivo de la propagación subcrítica de las fisuras.

$$\frac{\lambda^t}{\lambda} = \frac{C_\infty}{C_c} \cong \frac{1}{n} = cte. \qquad (8)$$

2.2.2. FORMULACIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO

Oldecop y Alonso (2001) desarrollaron un modelo constitutivo elastoplástico para escolleras introduciendo la influencia de la presencia de agua en su comportamiento mecánico. El modelo se desarrolló para estados de tensión a compresión (ensayo edométrico) tomando algunas características del modelo BBM (Alonso et al. (1990)) para suelos parcialmente saturados. Sin embargo, la natura de la influencia del agua en el comportamiento de la escollera está basada en un principio completamente distinto al de los suelos (ver apartado 2.1.1.). En consecuencia, los parámetros fundamentales para las escolleras son la tensión y la succión total mientras que en suelos se utiliza la succión matricial. La formulación descrita a continuación utiliza como variable la succión total pero se podría formular análogamente con la humedad.

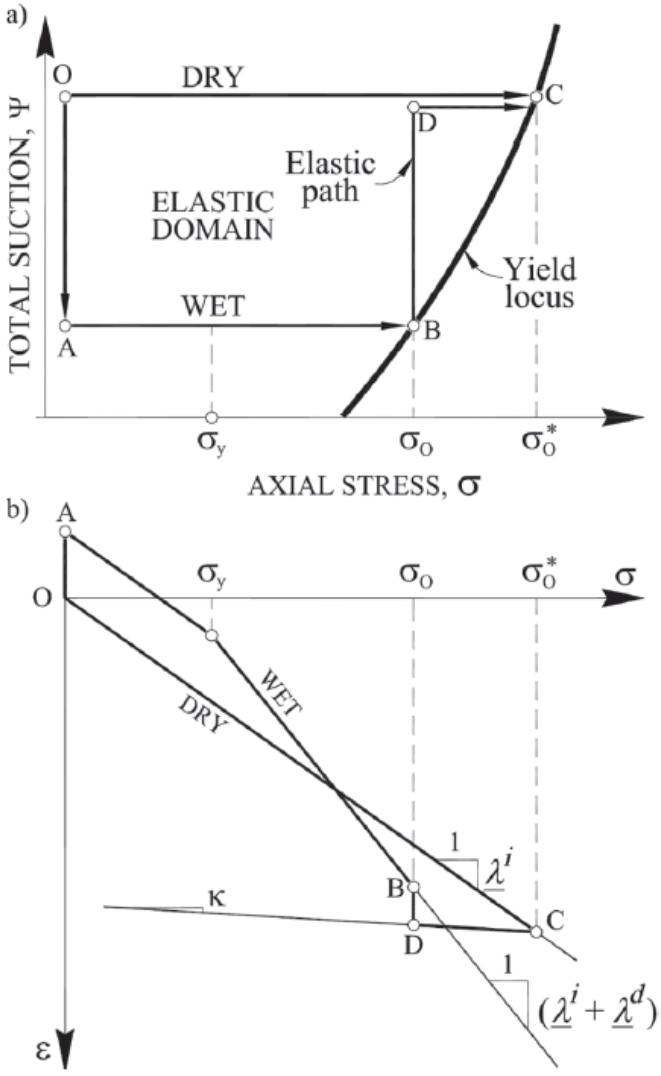


Figura 2-13 : Elementos básicos del modelo elastoplástico para escolleras formulado por Oldecop y Alonso (2001). (a) Superficie de fluencia en el espacio tensión-succión total y (b) Trayectorias tensión-deformación para un estado seco y húmedo de la muestra. (Oldecop y Alonso, 2013).

Siguiendo el modelo conceptual descrito, las deformaciones plásticas de la escollera tienen origen en dos mecanismos distintos: el mecanismo de deformación instantánea (IDM) y el mecanismo de deformación dependiente del tiempo (TDM). Las deformaciones instantáneas están presentes bajo cualquier estado tensional y son

independientes de la presencia de agua. Por otro lado, las deformaciones dependientes del tiempo aparecen bajo un umbral de tensión (σy) y dependen fuertemente de la acción del agua. Esta, es la causante del fenómeno de colapso observado en escolleras.

Según el estado tensional las líneas de consolidación normal se describen con la relación incremental siguiente:

$$d\varepsilon = \lambda^i d\sigma \quad para\ \sigma \leq \sigma_y \tag{9a}$$

$$d\varepsilon = \lambda d\sigma = \left[\lambda^i + \lambda^d(\varphi)\right] d\sigma \quad para\ \sigma > \sigma_y \tag{9b}$$

donde

σ tensión vertical aplicada

σ_y tensión de fluencia clástica

ε deformación vertical total

λ^i índice de compresibilidad instantáneo

$\lambda^d(\varphi)$ índice de compresibilidad clástica dependiente de la succión

Bajo el umbral σy (tensión de plastificación clástica) las deformaciones no se ven influenciadas por la acción del agua debido a que el mecanismo de deformación está gobernado por el reacomodo de los granos. A partir de este punto, la roca empieza a romperse y se incluye la contribución del mecanismo de deformaciones dependientes del tiempo. Una relación lineal entre el colapso y el logaritmo de la succión fue observada durante los experimentos llevados a cabo. Consecuentemente, se definió el índice de compresibilidad dependiente de la succión como:

$$\lambda^d(\varphi) = \lambda_0^d - \alpha_w \ ln\left(\frac{\varphi + P_{atm}}{P_{atm}}\right); \lambda^d(\varphi) \geq 0 \tag{10}$$

con el parámetro de compresibilidadα_w definido como:

$$\alpha_w = \frac{\chi_\varphi + \kappa_\varphi}{\sigma_o - \sigma_y} \tag{11}$$

donde

λ_0^d valor máximo del índice de compresibilidad clástica

α_w parámetro de compresibilidad

P_{atm} presión atmosférica

χ_φ índice de colapso

κ_φ índice de expansión/compresión

σ_o tensión constante aplicada

El parámetro de compresibilidad, parámetro propio del modelo, puede explicarse mediante los coeficientes experimentales χ_φ y κ_φ. Para valores de tensiones superiores al umbral σy, se observa una relación lineal entre el incremento de las deformaciones por colapso y el logaritmo de la succión. Con las medidas tomadas de los ensayos con trayectorias tensionales de carga-inundación-descarga, χ_φ es calculado como la pendiente de la relación entre las deformaciones y la succión durante la inundación de la muestra bajo una tensión constante σ_o.

$$d\varepsilon_{colapso} = \chi_\varphi \frac{d\varphi}{(\varphi + P_{atm})} \quad (12)$$

donde

$d\varepsilon_{colapso}$ deformación por colapso

Por otro lado, cuando la tensión aplicada es inferior al umbral de la plastificación clástica las partículas se reacomodan bajo aumento. Si la succión es modificada, en algunos materiales como la pizarra del río Pancrudo, se observan sistemáticamente hinchamientos moderados. En el modelo se introduce este fenómeno a partir del coeficiente elástico κ_φ medido como la relación entre la deformación de hinchamiento y el logaritmo de la succión. Para simplificar la formulación, κ_φ se considera independiente del nivel de tensiones.

$$d\varepsilon^\varphi = \kappa_\varphi \frac{d\varphi}{(\varphi + P_{atm})} \quad (13)$$

En el campo de deformaciones elásticas, se consideró también una componente κ actuando en las modificaciones de carga. Esta componente es independiente tanto de la acción del agua como del nivel de tensiones y se define como:

$$d\varepsilon^e = \kappa\, d\sigma \quad (14)$$

donde

κ índice de compresibilidad elástica

La superficie de fluencia se obtiene igualando la deformación total producida mediante el camino OC (camino seco) y el camino OABDC entre los mismos puntos iniciales OC, pero con una trayectoria distinta (ver figura 2-13). Si los puntos B y C pertenecen a la misma superficie de fluencia, existe una trayectoria elástica (dentro de la superficie de fluencia) para llevar la muestra desdel estado B (húmedo) hasta el estado C (seco). Esta trayectoria elástica implica una reducción de la succión bajo tensión constante (BD) seguida de la carga a succión constante (DC). Fruto de este principio, se obtiene la ecuación siguiente:

$$F(\sigma,\varphi) = \sigma_0\left[\lambda^i + \lambda^d(\varphi) - \kappa\right] - \sigma_y\lambda^d(\varphi) - \sigma_0^*\left(\lambda^i - \kappa\right) = 0 \qquad para\ \sigma > \sigma_y \quad (15a)$$

$$F(\sigma,\varphi) = \sigma_0 - \sigma_0^* = 0 \qquad para\ \sigma \le \sigma_y \quad (15b)$$

donde

σ_0^* parámetro de endurecimiento

La ley de endurecimiento queda establecida como:

$$d\sigma_0^* = \frac{d\varepsilon^p}{\lambda^i - \kappa} \qquad para\ \sigma_0^* < \sigma_0^{ch} \tag{16}$$

donde

σ_0^{ch} valor del parámetro de endurecimiento que separa la plastificación clástica del endurecimiento clástico

Este último parámetro fue introducido posteriormente por Oldecop y Alonso (2003) tras ampliar el programa de ensayos a una tensión máxima de 2,8 MPa en lugar del 1 MPa inicial. En la formulación inicial, desarrollada en 2001, no se alcanzó el endurecimiento clástico. Así pues, introduciendo cambios menores en la formulación, se puede extender el modelo constitutivo para todo el estado tensional. Para altas tensiones, el índice de compresibilidad pasa a ser lineal en el espacio tensión en escala logarítmica - deformación.

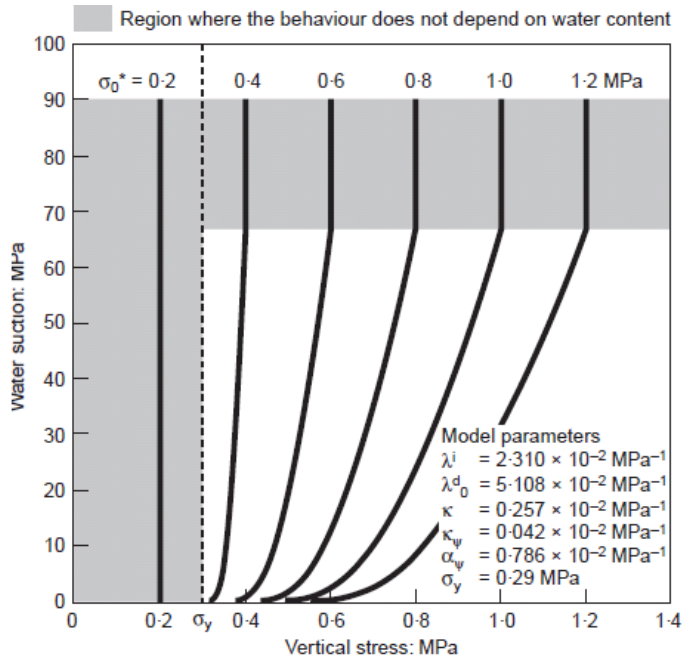
$$d\varepsilon = \lambda \frac{d\sigma}{\sigma} \qquad para\ \sigma_0^* > \sigma_0^{ch} \tag{17}$$

Además se introduce el valor del parámetro de endurecimiento σ_0^{ch} quien separa la plastificación clástica del endurecimiento clástico. Los datos experimentales recogidos por Oldecop y Alonso (2003) sugieren que el inicio del endurecimiento clástico viene determinado por un único valor de deformación plástica. Este fenómeno era de esperar puesto que el tipo de comportamiento mecánico está regido por la configuración real de la estructura granular y que, la deformación plástica (volumétrica) puede ser considerada como un parámetro que mide dicha configuración. De este modo, definir un umbral de deformación equivale a definir un umbral tensional.

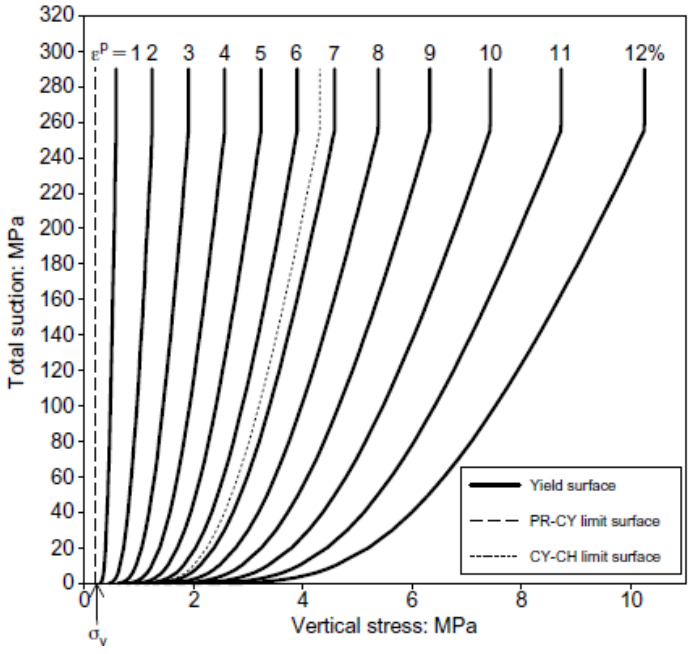
Bajo endurecimiento clástico la superficie de fluencia se rige por la misma ecuación (ec. (17)) pero la ley de endurecimiento queda establecida como:

$$d\sigma_0^* = \frac{\sigma_0^* - \sigma_y}{\sigma_0^{ch} - \sigma_y} \frac{d\varepsilon^p}{\lambda^i - \kappa} \qquad para\ \sigma_0^* > \sigma_0^{ch} \tag{18}$$

Las siguientes figuras muestran las superficies de fluencia calculadas a partir de los parámetros del modelo cuyo valor es obtenido con los datos de los resultados experimentales. La primera figura fue elaborada durante la primera formulación (Oldecop y Alonso (2001)) e incluye los conceptos de acomodo de las partículas ($\sigma \leq \sigma_y$) y la plastificación clástica ($\sigma_0^* \leq \sigma_0^{ch}$).La segunda figura, desarrollada durante la segunda fase de investigaciones (Oldecop y Alonso (2003)), incluye además el endurecimiento clástico ($\sigma_0^* > \sigma_0^{ch}$).



(a)



(b)

Figura 2-14 : Superficies de fluencia calculadas a partir de los parámetros obtenidos experimentalmente. (a) Oldecop y Alonso (2001) y (b) Oldecop y Alonso (2003).

Para el comportamiento en función del tiempo los registros de las deformaciones indican una relación lineal entre la deformación y el tiempo en escala logarítmica.

$$\lambda^t = \frac{d\varepsilon}{d(Ln\ t)} \qquad (19)$$

donde

λ^t índice de compresibilidad dependiente del tiempo

Si se representa el índice de compresibilidad dependiente del tiempo en función de la succión y la tensión aplicada se observa una correlación lineal excepto para altas tensiones, donde el comportamiento no es tan claro.

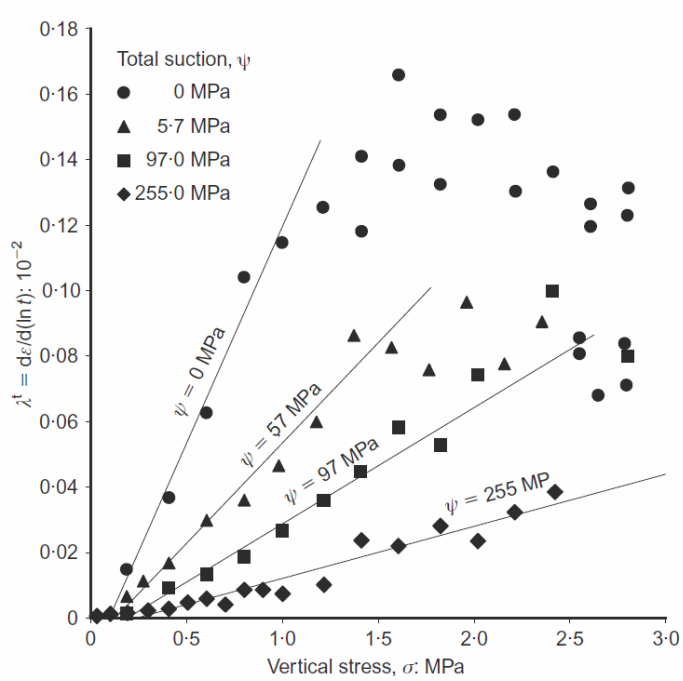


Figura 2-15: Índice de compresibilidad dependiente del tiempo en función de la carga y de la succión (Oldecop y Alonso, 2007).

2.2.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EXPERIMENTALES

Anteriormente se ha descrito el modelo constitutivo propuesto por Oldecop y Alonso junto con los parámetros que lo definen. A continuación, se detalla cómo obtener su valor basándose en los resultados de los ensayos llevados a cabo. Para cada muestra, correspondiente a un único ensayo edométrico con un determinado índice de poros inicial, se ha calculado el valor de dichos parámetros a partir de los resultados experimentales del ensayo. En otras palabras, en un mismo material (con la misma distribución granulométrica, con partículas con la misma forma) se han recalculado los parámetros para cada muestra (asociada a un índice de poros inicial). Una vez obtenidos los valores, se han introducido en el modelo matemático y se ha comparado el comportamiento experimental observado con el comportamiento teórico predicho por el modelo constitutivo.

Los parámetros que definen el modelo propuesto por Oldecop y Alonso son los siguientes:

λ^i índice de compresibilidad instantáneo. Corresponde al pendiente de la recta de compresión virgen cuando solo actúa la deformación instantánea causada por el reacomodo de las partículas. Se observa en muestras muy secas o en cualquier muestra siempre que no se supere la tensión de fluencia clástica.

λ_0^d valor máximo del índice de compresibilidad dependiente de la succión. Contribuye al pendiente $(\lambda^i + \lambda_0^d)$ de la recta de compresión en condiciones saturadas.

λ índice de compresibilidad durante el endurecimiento. Corresponde al pendiente de la recta de compresión en escala semilogarítmica cuando se produce endurecimiento.

σ_y tensión de fluencia clástica. Determina el inicio de la rotura de las partículas. Se calcula a partir de la siguiente expresión (Oldecop y Alonso (2001)). Para ello se deben realizar dos ensayos. Un primero se medirá el colapso fruto de la inundación a tensión constante (σ_0) de una muestra inicialmente muy seca. En el segundo, se obtendrá la deformación de hinchamiento inundando una muestra a baja tensión.

$$\sigma_y = \sigma_0 - \frac{\Delta\varepsilon_{colapso} - \Delta\varepsilon_{hinchamiento}}{\lambda_0^d} \quad (20)$$

σ_0^{ch} valor del parámetro de endurecimiento que separa la plastificación clástica del endurecimiento clástico.

κ índice de compresibilidad elástica. Corresponde al pendiente de la recta de compresión cuando la deformación es elástica. Se calcula durante los ciclos de descarga-carga.

χ_φ índice de colapso. Corresponde al pendiente de la recta succión-colapso (figura 2-16). Se obtiene de los ensayos de colapso a tensión constante mediante un sistema de control de la succión. En el presente estudio no se ha instrumentado el equipo para poder imponer una succión. Por este motivo, la recta se obtendrá tan solo con el punto inicial y final (equivalentes al test 3 de la figura 2-16).

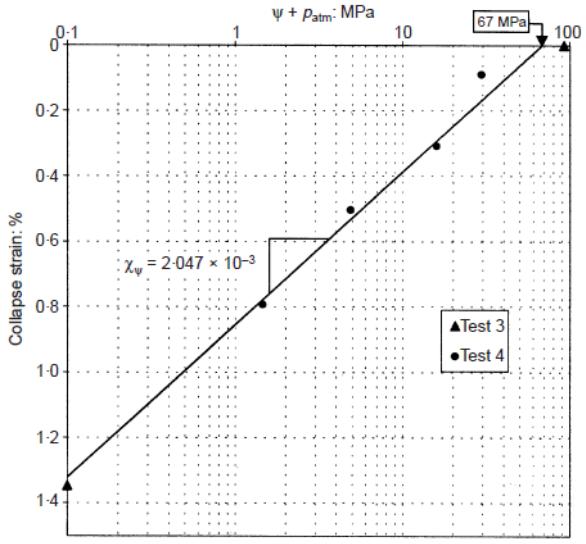


Figura 2-16: Deformación por colapso en función de la succión total para una tensión vertical de 0,6 MPa (test 3 y 4) (Oldecop y Alonso, 2001).

κ_φ índice de expansión/compresión. Corresponde a la pendiente succión-deformación en el caso de hinchamiento (o bien secado).

2.3. TEORÍA DE LA MOJABILIDAD

2.3.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

En el presente estudio analizaremos el caso particular que concierne a la interacción entre un líquido y un sólido. Entonces, se puede definir la mojabilidad como la capacidad que tiene un líquido a extenderse con mayor o menor facilidad sobre una superficie. Este fenómeno viene determinado por el equilibrio entre las fuerzas intermoleculares de ambas sustancias, especialmente en las superficies de contacto.

En el líquido, las fuerzas intermoleculares presentes están directamente relacionadas con la tensión superficial de este (entendida como la cantidad de energía necesaria para aumentar en una unidad su superficie). El fenómeno físico viene dado por la interacción entre las moléculas del líquido. En el interior del líquido una molécula está completamente rodeada por otras moléculas vecinas, dando como resultado cero el sumatorio de las fuerzas. Por otro lado, en una molécula situada en la superficie, el balance de fuerzas ya no es nulo puesto que la cantidad de moléculas vecinas es menor (considerando que las fuerzas de atracción del aire son despreciables). Como consecuencia, el líquido tiende a encontrar una forma tal que la energía sea mínima teniendo en cuenta que las moléculas en superficie están en un estado de mayor energía.

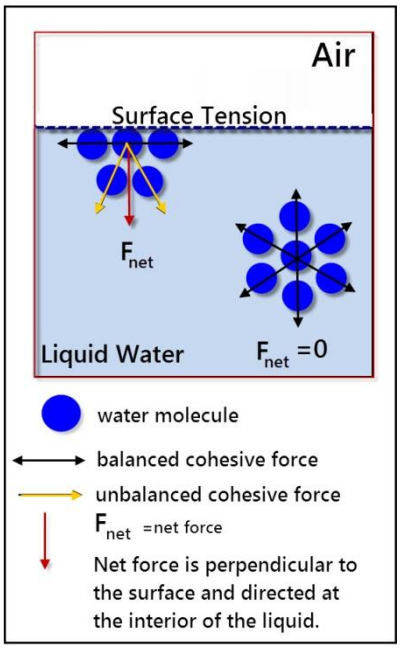


Figura 2-17 : Balance de fuerzas intermoleculares de un líquido. Diferencia entre una molécula en superficie y una en el interior del líquido.

En el sólido, las fuerzas que intervienen son las fuerzas de adhesión que a la vez dependen de la estructura y la naturaleza de los enlaces entre sus moléculas. Existen dos tipos principales de superficies sólidas según la dificultad a la hora de romper dichos enlaces; llamadas superficies de alta energía y superficies de baja energía. Las superficies de alta energía presentan unos enlaces químicos fuertes difíciles de romper. En otras palabras, las fuerzas de adhesión son mayores que en los sólidos de baja energía, donde las fuerzas de unión tienen un carácter físico debido tan solo a las

interacciones entre las mismas moléculas. Los metales, el cristal y la cerámica son ejemplos clásicos de superficies de alta energía mientras que con polímeros como el polietileno o el teflón se pueden obtener superficies de baja energía.

Cuando hablamos de mojabilidad entre un sólido y un líquido interviene la relación entre las distintas fuerzas que se encuentran en ambas sustancias. Es el resultado del equilibrio alcanzado o, lo que es lo mismo, un estado de mínima energía.

El coeficiente entre las fuerzas de cohesión del líquido y las fuerzas de adhesión del sólido determina si un líquido moja o no una superficie. Si las fuerzas de cohesión son más importantes que las de adhesión, las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido son importantes de modo que la gota permanecerá solidaria con un perfil convexo. Por el contrario, si las fuerzas de adhesión son más importantes que las fuerzas de cohesión, en el caso de las superficies de alta energía, el líquido ofrecerá una mojabilida completa.

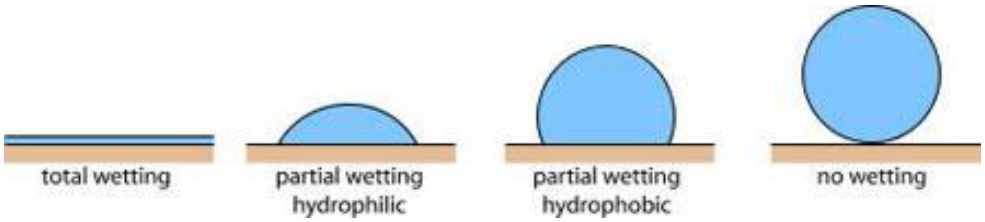


Figura 2-18: Distintos grados de mojabilidad entre un líquido y un sólido (Marmottant, 2008. Recuperado http://wikipedia.com).

El siguiente esquema muestra la importancia de la naturaleza del sólido y del líquido respecto a su mojabilidad.

Sólido	Líquido	Mojabilidad	Balance de fuerzas
De alta energía →	Mayoría de líquidos →	Completa →	$\uparrow\uparrow\uparrow F_{adhesión} > F_{cohesión} \uparrow\uparrow$
De baja energía →	Alta tensión superficial →	Parcial →	$\downarrow F_{adhesión} < F_{cohesión} \uparrow\uparrow$
	Baja tensión superficial →	Completa →	$\downarrow F_{adhesión} > F_{cohesión} \downarrow\downarrow$

Figura 2-19: Distintos grados de mojabilidad entre un líquido y un sólido.

Las fuerzas mencionadas anteriormente explican a su vez la capilaridad, pudiéndose ver como un caso particular puesto que corresponde a la mojabilidad entre un líquido y un tubo capilar. La facilidad con la que fluye el líquido, subiendo o bajando, es función del balance entre las fuerzas de adhesión a las paredes y las fuerzas cohesivas internas del líquido.

Así pues, los líquidos con baja tensión superficial presentaran un menisco cóncavo, exhibiendo una buena mojabilidad, mientras que los de alta tensión superficial, como en el caso del mercurio, presentaran una superficie convexa al no mojar las paredes del tubo capilar. La siguiente figura muestra la analogía entre el ejemplo clásico de mojabilidad y el caso particular del tubo capilar prestando especial atención a las fuerzas que actúan.

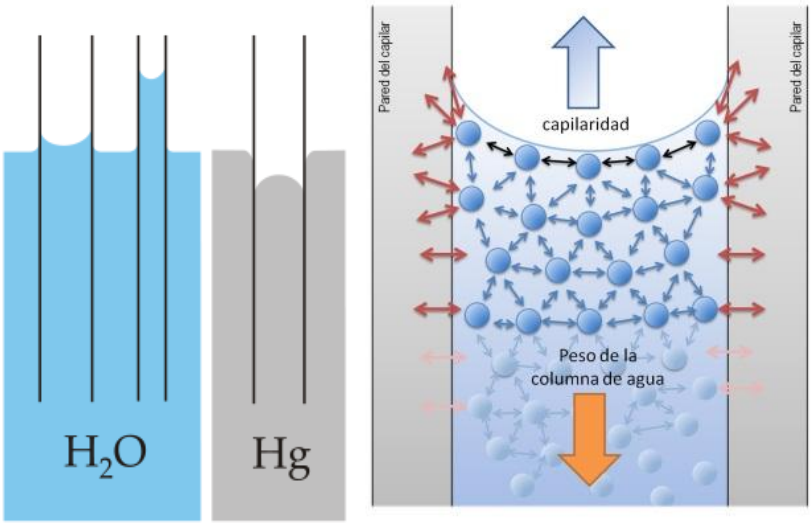


Figura 2-20: Efecto de la capilaridad y balance de fuerzas presentes. Analogía con la mojabilidad líquido – superficie sólida (recuperado de http://wikipedia.com).

2.3.2. ÁNGULO DE CONTACTO

2.3.2.1. Superficies ideales

El parámetro básico para medir la mojabilidad reside en el ángulo de contacto o también llamado ángulo de humectancia. Cuando un líquido es arrojado a una superficie sólida, este alcanza el equilibrio en el momento en el que el menisco forma un determinado ángulo con la superficie sólida. Este ángulo es quien caracteriza la mojabilidad y es intrínseco al conjunto líquido-sólido de estudio.

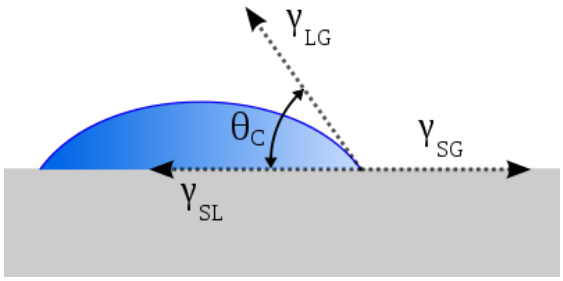


Figura 2-21: Ángulo de contacto (Gillis, 2006. Recuperado de http://wikipedia.com).

Esta aproximación estática del ángulo de contacto puede expresarse en función de las fuerzas intermoleculares, es decir, de la tensión superficial de las distintas fases. La ecuación de Young describe el equilibrio del líquido al entrar en contacto con la superficie:

$$\cos\theta_Y = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \qquad (21)$$

donde θ_Y es el ángulo de contacto de Young, γ_{LG} la tensión superficial del líquido, γ_{SL} la energía superficial sólido-líquido y γ_{SG} la energía superficial sólido-gas.

El valor que toma el ángulo permite clasificar las superficies en hidrófoba e hidrófila según el grado de mojabilidad que presenta. Se define como material hidrófilo aquel

material que es mojado (θ<90°) mientras que un material hidrófobo es aquel en el que al entrar una gota en contacto con su superficie forma un ángulo de contactoθ>90°. En la naturaleza se encuentran también las llamadas superficies superhidrófobas, como es el caso de las hojas de algunas plantas o las escamas de los peces. En estos casos el ángulo de contacto es superior a 150°.

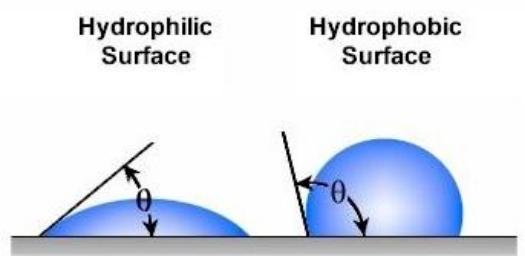


Figura 2-22: Relación entre el ángulo de contacto y la mojabilidad (recuperado de http://www.sciencebrainwaves.com).

La formulación de Young fue desarrollada en una primera aproximación semi-empírica. Posteriores investigaciones introdujeron un marco termodinámico afirmando la no existencia de un único valor deθ.El ángulo de contacto permanece en un rango de valores comprendidos entre los llamados ángulo de avance (θ_{avc}) y ángulo de retroceso (θ_{retc}). El primero aparece cuando se añade agua al sistema mientras que el segundo se alcanza cuando el líquido pierde moléculas. Es en el caso ideal y estático, donde ni se gana se ni se pierde masa, que el sistema logra un estado más estable. Se consiguen valores de θsimilares pudiéndose aproximar con las ecuaciones desarrolladas.

Se llama histéresis a la diferencia entre el ángulo de avance (máximo) y el ángulo de retroceso (mínimo). Este parámetro puede disminuirse (H<5°) pero es difícil de eliminar (H>1°). Aun suponiendo el caso de una gota en una superficie llana siempre será presente debido a la heterogeneidad del material. En superficies no ideales, como los suelos, se obtienes histéresis mayores cuando mayor es la heterogeneidad química (Good, 1993), así como con la rugosidad (McHale, 2004).

$$Hr = \theta_{avc} - \theta_{retc} \qquad (22)$$

El control de la histéresis es sujeto de especial interés en la bibliografía desarrollada hoy en díadebido a su importancia en la obtención de una superficieautolimpiante (*self-cleaningsurface*). En el presente estudio, se considerará como satisfactoria la obtención de una superficie hidrófoba sin ninguna restricción en términos de histéresis. Algunos de los métodos empleados para la medición del ángulo de contacto de un suelo tienen un principio dinámico. Eso conlleva a la medición del ángulo de avance y de retroceso cuyos valores permiten calcular una aproximación del ángulo en el equilibrio. Según Marmur (1994):

$$\theta = arcos((\cos\theta_{avc} + \cos\theta_{retc})/2) \qquad (23)$$

2.3.2.2. Superficies rugosas

La mojabilidad, y por lo tanto el ángulo de contacto, no solo dependen de la naturaleza química de los materiales sino que morfología de las estructuras de la superficie, tanto

a nivel micro como nano, toman un papel importante. Esta relación fue descrita inicialmente en 1963 por Wenzel quien propuso una aproximación del ángulo medido (θ_W) en función de la rugosidad, expresada a partir del parámetro adimensional R_f.

$$\cos\theta_W = R_f \cos\theta_Y \qquad (24)$$

La figura siguiente muestra la aproximación de Wenzel, válida para una interfaz homogénea sólido-líquido. La rugosidad es introducida por el factor R_f que consiste en el coeficiente entre el área real de la superficie de contacto sólido-líquido y la superficie llana proyectada (R_f>1 para superficies rugosas y R_f=1 para superficies lisas).

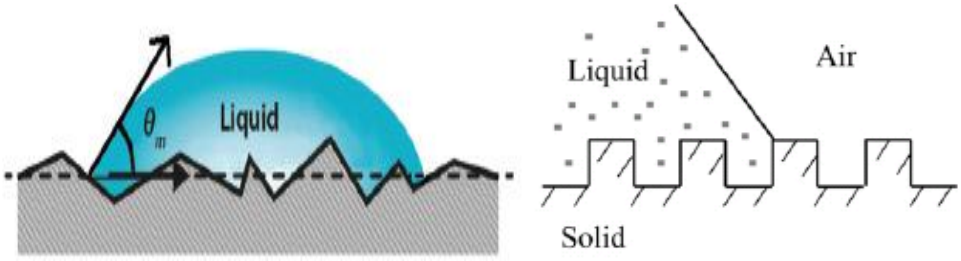


Figura 2-23: Aproximación de Wenzel. Válida para una interfaz homogénea sólido-líquido (Biolin Scientific, 2008 y Nosonovsky (2009).

De la ecuación (24) se deduce que la rugosidad acentúa el comportamiento hidrófilo e hidrófobo de una superficie. Si una superficie lisa es hidrófila (θ_Y<90°) el factor R_f modifica el ángulo de contacto medido disminuyéndolo. Por el contrario, si la superficie es hidrófoba (θ_Y>90°), la rugosidad hace que el ángulo de contacto aumente mejorando así este fenómeno. La figura siguiente dibuja la ecuación (24) para distintos valores de rugosidad.

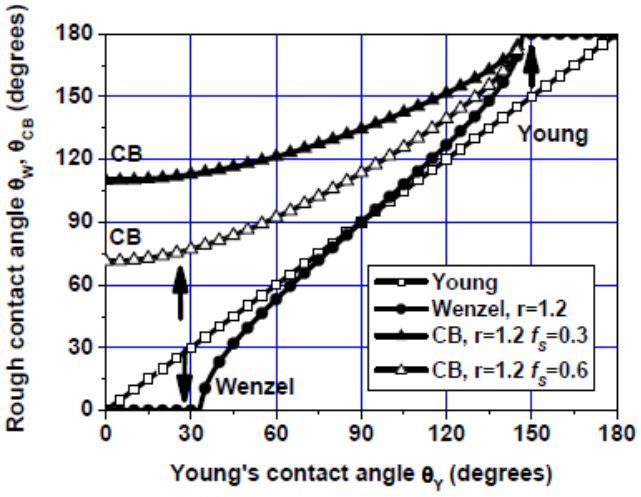


Figura 2-24: Evolución del ángulo de contacto de la aproximación de Wenzel respecto al ángulo de contacto de Young para distintos valores de rugosidad (Banerjee, 2008).

Más tarde Cassie y Baxter consideraron el caso de una superficie rugosa y a la vez heterogénea a nivel de los materiales que la forman. Para una superficie con “n”

materiales distintos, cada uno con una fracción f_i $(f_1 + f_2 + \cdots + f_n = 1)$, la ecuación de Cassie-Baxter se expresa como:

$$\cos\theta_{CB} = \sum_{i=1}^{n} f_i \cos\theta_{i,Y} \qquad (25)$$

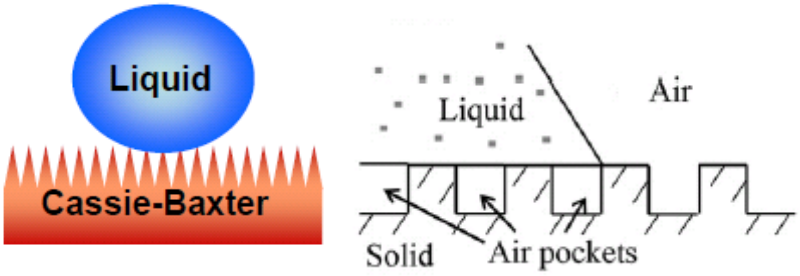


Figura 2-25: Aproximación de Cassie-Baxter. Válida para superficies heterogéneas (Banerjee, 2008 y Nosonovsky (2009).

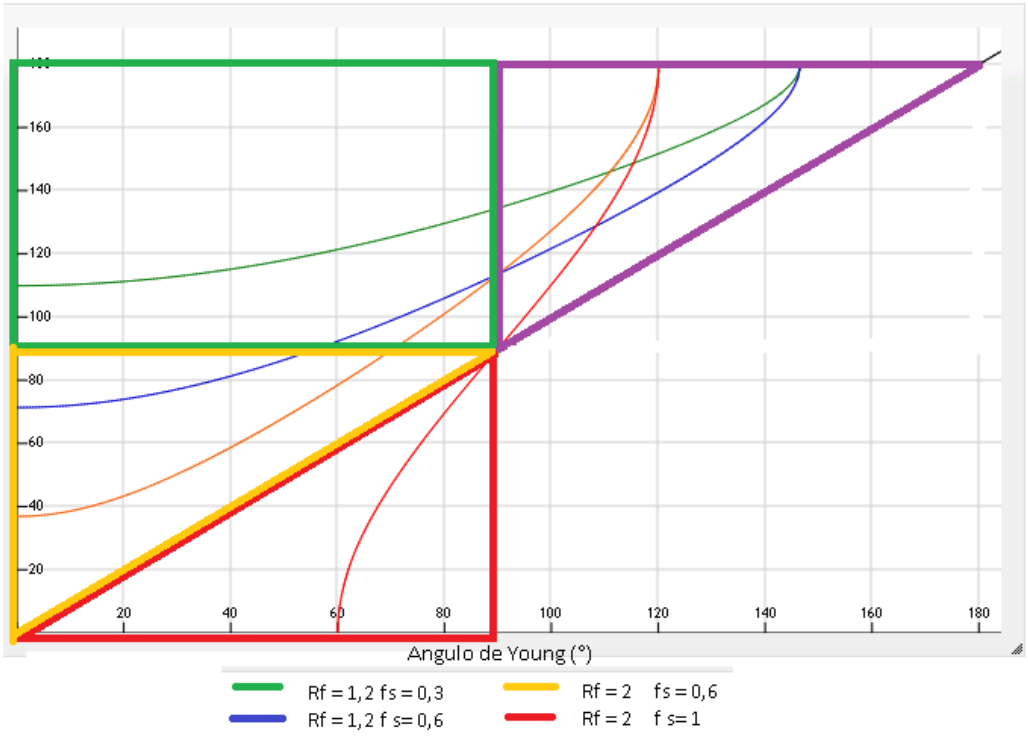
Esta aproximación fue desarrollada para modelizar el hecho que en las asperezas de la superficie tienden a atraparse burbujas de aire. De este modo, tenemos el caso particular donde la fracción sólida de la superficie corresponde a $f_1 = f_S$ con $\cos\theta_{S,Y} = \cos\theta_Y$ y la fracción de los poros a $f_2 = f_G$ con $\cos\theta_{S,Y}$= -1. Sustituyendo dichos valores junto con la incorporación de la rugosidad obtenemos:

$$\cos\theta_{CB} = \mathrm{R}_f f_S \cos\theta_Y - f_G = \mathrm{R}_f f_S \cos\theta_Y + f_S - 1 \qquad (26a)$$

O bien

$$\cos\theta_{CB} = \mathrm{R}_f \cos\theta_Y - f_G(\mathrm{R}_f \cos\theta_Y + 1) \qquad (26b)$$

Dibujar las ecuaciones anteriores modificando los parámetros de rugosidad y de presencia de aire nos permite observar la contribución de cada uno en referencia a la mojabilidad de la superficie. Por un lado, la presencia de aire definida con valores decrecientes de f_S, incrementa siempre el ángulo de contacto θ_{CB} haciendo que teóricamente sea posible la obtención de una superficie superhidrófoba. Por otro lado, tal y como se ha descrito anteriormente, la rugosidad influye en la excentricidad de la función respecto al ángulo de Young θ_Y=90°.



En verde: zona inicialmente hidrófila → se convierte en hidrófoba

En amarillo: zona inicialmente hidrófila → se disminuye la mojabilidad pero permanece hidrófila.

En morado: zona inicialmente hidrófoba → permanece hidrófoba

En rojo: zona inicialmente hidrófila → se aumenta la mojabilidad (disminución de θ_Y)

Figura 2-26: Evolución del ángulo de contacto de la aproximación de Cassie-Baxter respecto al ángulo de contacto de Young para distintos valores de rugosidad y de fracción sólida.

Al igual que en la aproximación de Wenzel, el modelo de Cassie-Baxter afirma que una superficie inicialmente hidrófoba no puede convertirse en hidrófila con la modificación de la rugosidad o con la presencia de aire en la interfaz ya que ambos disminuyen la mojabilidad (ver zona morada en la figura 2-26). Por el contrario, mediante la disminución de la fracción sólida en la interfaz, una superficie inicialmente hidrófila puede llegar a convertirse en hidrófoba (ver zona verde en la figura). Para que tenga lugar este cambio de comportamiento de la superficie, f_S deberá ser menor cuanto más rugosa sea la superficie (incremento de R_f). De no ser así, la superficie permanecerá hidrófila pudiéndose encontrar incluso una combinación de par de f_S y R_f que tenga un efecto desfavorable con la (disminución de θ_Y).

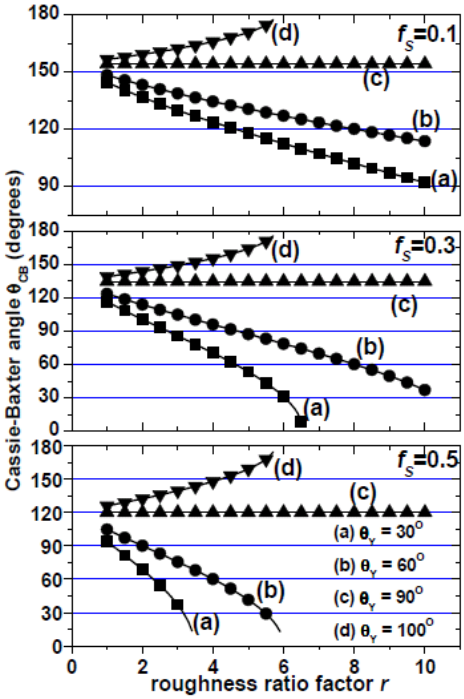


Figura 2-27 : Evolución del ángulo de contacto del modelo Cassie-Baxter's en función de r, fs y del ángulo de contacto de Young (Banerjee, 2008).

En definitiva, conocer la morfología de la interfaz sólido-líquido-gas es indispensable para controlar el valor del ángulo de contacto. Cabe destacar que para una superficie sólida inicialmente hidrófoba, cualquier dotación de rugosidad o de la fracción gaseosa de la superficie de contacto será favorable frente a una menor mojabilidad. Es preciso subrayar este hecho debido al objetivo primero del estudio, obtener un material granular con características hidrófobas mediante un tratamiento o recubrimiento de su superficie. De este modo, una vez encontrada una metodología adecuada para producir una protección hidrófuga del material, se planteará el hecho de modificar la rugosidad con el objetivo de mejorar su comportamiento gracias a sus características físicas. Sin embargo, en los estudios consultados no se observaron en ninguna muestra ángulos de contacto superiores a 150°. Los materiales utilizados fueron arenas, limos y arcillas recubiertas de un agente hidrófobo donde la estructura del suelo forma superficies rugosas.

2.4. SUPERFICIES HIDRÓFOBAS ARTIFICIALES

La propiedad de no mojabilidad de que disponen las superficies hidrófobas ha sido de gran interés en estos últimos años debido al largo alcance de aplicación. La motivación en la fabricación de superficies autolimpiante (*self-cleaningsurface*) se extiende a múltiples ámbitos yendo desde la biomedicina, con la fabricación de vasos sanguíneos artificiales, hasta la industria del textil pasando por la protección de tecnologías como los paneles solares o los satélites. Cabe destacar que en el dominio de la ingeniería civil aparece una línea de investigación activa centrada en el desarrollo de protecciones hidrófobas para hormigones contra los ataques por sulfatos o cloruros. En ingeniería de suelos, la creación de suelos hidrófobos artificiales está motivada por la reproducción de suelos naturales con dichas características y su estudio en el laboratorio. Las técnicas para la obtención de una superficie hidrófoba se clasifican en

dos categorías: dotar de rugosidad una superficie hecha con material de baja energía superficial o bien modificar una superficie inicialmente rugosa con un material de baja energía superficial. En ambos casos el resultado deseado es un aumento significativo del ángulo de contacto.

De entre las diferentes metodologías para la obtención de superficies hidrófobas se han retenido aquellas susceptibles de ser compatibles con el suelo de estudio (Pizarras del río Pancrudo). Además, se favorecerán los procesos más desarrollados a nivel de estudio, que su vez sean económicamente factibles y simples des del punto de vista de la tecnología y los materiales requeridos.

2.4.1. RECUBRIMIENTOS PROBADOS EN SUELOS

2.4.1.1. Tratamientos a base de Dimethyldiclorosilano (DMDCS)

El Dimethyldiclorosilano (DMDCS), con composición $(CH_3)_2SiCl_2$, es el producto más utilizado en la literatura en tratamientos sintéticos para crear muestras de suelos hidrófobas. Bachmann et al. (2000) fue de los primeros autores en utilizar este producto químico para recubrir las partículas de distintas arenas y limos. El proceso más extendido para hidrofobizar un suelo con DMDCS consiste en una aplicación directa de este. El suelo es mezclado con el producto químico, luego se satura la mezcla con agua desionizada (removiendo constantemente para evitar la formación de agregados) y finalmente se deja secar al aire. El proceso de secado es importante puesto que se ha demostrado que el grado de mojabilidad obtenido es función de la temperatura (nótese que las características hidrófobas de un suelo se ven mejoradas tras estar sometido a altas temperaturas). Ramírez-Flores et al. (2009) implementó un recubrimiento de DMDCS mediante la evaporación. Esta técnica produce muestras más estables, pero requiere un equipamiento específico. Además, se tiene un menor control sobre las muestras ya que la cantidad de DMDCS adherido a la superficie no se puede evaluar con precisón ya que han sufrido un tratamiento térmico.

Durante el proceso de silanización, el DMDCS reacciona con el agua produciendo polydimethylsiloxane (PDMS) junto con ácidohidroclórico (HCl).

$$n[Si(CH_3)_2Cl_2] + n[H_2O] \rightarrow [Si(CH_3)_2O]_n + 2nHCl,$$

Figura 2-28: Química entre los hidroxilos de la superficie del suelo con el DMDCS.

Los átomos de oxigeno de las moléculas de PDMS interaccionan con grupos polares presentes en las partículas del suelo (p.e. grupos de –OH). Por otro lado, la componente (-CH3) orientada hacia el exterior de las partículas sólidas produce superficies hidrófobas (Goebel et al. (2007)).

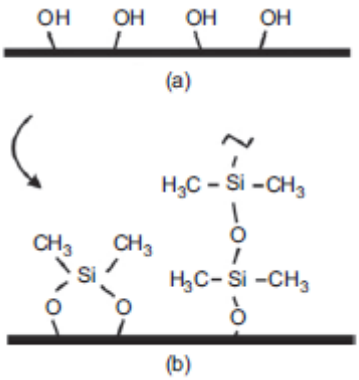


Figura 2-29: Configuración molecular (a) del suelo natural y (b) del suelo tratado. (Ng y Lourenço, 2015).

Otra molécula resultante de la reacción es el HCl que puede influenciar en las propiedades químicas, térmicas y eléctricas del suelo. Por ejemplo, cuando se disuelve en agua contribuye en una disminución del pH del suelo.

La mayoría de estudios dan pocos detalles de las concentraciones requeridas para llegar a cierto grado de hidrofobicidad. En un primer estudio Bachmann et al. (2000) se utilizaron concentraciones de 7,5ml kg^{-1} y 50ml kg^{-1} de DMDCS para arenas y limos respectivamente. Ju et al. (2008) utilizó rangos de entre 16,8 ml kg^{-1} y 84ml kg^{-1}para suelos limosos. Ramírez-Flores et al. (2009) especifica unas concentraciones de entre 5,5 10^{-3} ml kg^{-1} y 10ml kg^{-1} en arenas y limos. También Lourenço et al. (2015), utilizó una concentración de 1 ml kg^{-1} de DMDCS en arenas. Las cantidades utilizadas no son justificadas con precisión. Se considera que en limos, cuya superficie específica a es mayor, las concentraciones de DMDCS requeridas son de un orden de magnitud superior a las de las arenas.

Fueron Ng y Lourenço (2015), quien analizaron en detalle la influencia de la concentración de DMDCS en el valor del ángulo de contacto (máximos de entre 137° y 143°). Las muestras utilizadas fueron arenas naturales y réplicas de granito con la misma granulometría. Los resultados obtenidos muestran que el ángulo de contacto aumenta con la concentración de DMDCS hasta un valor máximo que permanece constante. En las réplicas, una concentración en masa de <0,5% (equivalente a 4,7 $mlkg^{-1}$) es suficiente para alcanzar dicho máximo. Un segundo programa de experimentos con concentraciones inferiores a 0,5% fue llevada a cabo en las arenas de Leighton Buzzard. Los resultados revelaron que se alcanza el ángulo de contacto máximo con una concentración de DMDCS de 0,005%. Por el contrario, en los suelos naturales estos valores aumentan entre 2-3%. Una explicación a este fenómeno es el hecho que los suelos naturales presentan agua residual y materia orgánica en su estructura. Entonces, las partículas no pueden ser cubiertas por completo por el agente hidrófobo.

El procedimiento a seguir en el laboratorio depende del autor. Las principales diferencias entre unos y otros es el proceso de secado y el uso de pretratamientos térmicos. En los diferentes artículos de Lourenço uso muestras de 100 g de suelo secadas previamente al aire. Introdujo la cantidad de DMDCS con una pipeta, seguidamente añadió agua hasta saturar la muestra y mezcló las muestras de 30 segundos a 5 minutos. El proceso tuvo lugar bajo una campana extractora de humos

para eliminar el HCl en forma de gas que se forma en la reacción. Las medidas de mojabilidad se llevaron a cabo tres días después de la implantación del recubrimiento habiendo dejado secar las muestras al aire. Por otro lado, otros autores introducen una etapa final de saturación de la muestra con agua desionizada antes del secado al aire. En este caso las muestras fueron saturadas una hora después de la aplicación del agente hidrófobo para eliminar cualquier compuesto químico surgido de la reacción y sensible de reaccionar nuevamente a lo largo del estudio. En la bibliografía también se hace referencia a procesos térmicos para el secado de la muestra. Estos procesos pueden ser pre-tratamientos para eliminar las impurezas de carácter orgánico de la muestra, así como post-tratamientos de secado para eliminar el agua desionizada y fijar el DMDCS. Tal y como se ha descrito anteriormente, se ha demostrado que la mojabilidad es función de la temperatura lo que nos lleva a evitar altas temperaturas para no influenciar y modificar la muestra.

2.4.1.2. Tratamientos a base de n-octyltriethoxysilano

El segundo compuesto químico más empleado en suelos es el n-octyltriethoxysilano, cuya composición es $C_{14}H_{32}O_3Si$. Este aditivo artificial pertenece al grupo de los silanos lo que conlleva a una estructura química parecida a la del DMDCS. En este caso, durante el proceso de silanización los hidroxilos (-OH) de la superficie de las partículas del suelo son sustituidos por grupos etoxi liberando a la vez etanol. El enlace entre el silicio y el oxígeno es fuerte por lo que el recubrimiento permanece estable.

$$\equiv Si-OH + C_8H_{17}Si(OC_2H_5)_3 \Rightarrow \equiv Si-O-Si(OC_2H_5)_2C_8H_{17} + C_2H_5OH$$

Figura 2-30 : Reacción química entre los hidróxilos de la superficie del suelo con el n-octyltriethoxysilane. Como resultado se obtiene un recubrimiento hidrófobo estable junto con etanol. (Da Re, 2000).

El procedimiento empleado fue inicialmente propuesto por Da Re (2000). En su trabajo las muestras fueron sumergidas con una relación al 5% en una solución de n-octyltriethoxysilane y etanol durante 24 horas en un ambiente controlado. Posteriormente se dejó secar al aire. Truong et al. (2011) y Kim et al. (2011) modificaron el procedimiento dando un protocolo similar en ambos estudios. Las muestras son limpiadas en un primer instante con agua desionizada para eliminar la materia orgánica presente. Seguidamente se quita el excedente de agua con un secado en el horno. Se añade una solución al 10% en volumen de n-octyltriethoxysilane y alcohol isopropílico donde se deja sumergida la muestra durante 48-72 horas. Finalmente, las muestras son limpiadas de nuevo con agua desionizada y secadas en el horno durante 24 horas. Los ángulos de contacto resultantes fueron de ~100° y ~110° respectivamente. Kim et al. (2011) detallaron las características del recubrimiento examinadas con el microscopio electrónico. Se trata de una cobertura de ~100 nm de grosor con cierta rugosidad que se extiende sobre el 13% de la superficie.

Lee et al. (2015)analizaron la influencia de la concentración de n-octyltriethoxysilane en el grado de mojabilidad trabajando con concentraciones des del 0,01% hasta el 10%. Los recubrimientos obtenidos van aumentando de espesor junto con el aumento de concentración de silano pasando de órdenes de la decena de nanómetros hasta alcanzar la centena. El ángulo de contacto fue medido indirectamente dando resultados máximos de alrededor de ~110°. También se observó que el suelo de

estudio, de carácter limoso, la porosidad tiene un papel más relevante que la concentración de agente hidrófobo en las medidas del ángulo de contacto. Estas observaciones están relacionadas con el método usado para medir el ángulo de contacto. Este, siendo indirecto, analiza el comportamiento del conjunto de la muestra frente a la penetración de una gota de agua.

2.4.2. RECUBRIMIENTOS NO PROBADOS EN SUELOS

2.4.2.1. Tratamientos a base de Polydimethysiloxane (PDMS)

Actualmente una gran variedad de técnicas y procesos se están llevando a prueba para el desarrollo de películas hidrófobas en superficies sólidas. De entre las distintas metodologías propuestas destacan aquellas que consisten en modificar químicamente la superficie realizando así una superficie hidrófoba artificial. Gran parte de los trabajos tienen como base el polydimethysiloxano (PDMS). Este hecho se debe a su bajo coste y a la simplicidad de la tecnología requerida.

Park consiguió realizar una película de PDMS sobre sílice porosa mediante la técnica de deposición térmica. Los materiales empleados fueros PDMS en estado líquido y un reactor pudiendo alcanzar altas temperaturas. Las partículas de sílice porosa fueron introducidas en el reactor durante 16 horas a 300°C consiguiendo así un recubrimiento uniforme debido a la evaporación del PDMS y a su posterior deposición en la superficie de la sílice.

Esta técnica tiene como gran ventaja el alcance del recubrimiento, llegando a penetrar los poros superiores a ~8nm. El ángulo de contacto observado fue del orden de 170°.

Otro ejemplo es el trabajo de Zhiqing, donde revisa los distintos revestimientos a base de PDMS desarrollados hasta la actualidad y propone una formulación más eficaz y simple para generar una superficie hidrófoba. En su trabajo también demostró que la película hidrófoba generada es resistente a la abrasión, con la posibilidad de ser fácilmente reparada. Además, comprobó la su eficacia en distintos materiales tales como el papel, el cristal o el cobre.

Los materiales empleados fueron PDMS en estado líquido, *dibutyltindilaurate* y silicato de etilo como catalizadores para solidificar el PDMS, acetato de etilo como disolvente y finalmente nanopartículas de $CaCO_3$ para incorporar rugosidad a la superficie. El procedimiento empleado consiste en diluir 10g de PDMS en 50 g de acetato de etilo. Se añaden las nanopartículas de $CaCO_3$ y se mezcla durante 5 minutos. A continuación, se introducen 0,1 g de *dibutyltindilaurate* y 0,45g de silicato de etilo y se mezcla nuevamente durante 10 minutos. Finalmente se vierte la mezcla encima de la superficie, inclinándola para que el líquido recubra toda la superficie. Una vez se ha secado, el material tratado dispone del recubrimiento hidrófobo.

Distintas concentraciones de $CaCO_3$fueron analizadas concluyendo que en un estado inicial, cuando mayor es la cantidad de nanopartículas, mayor será el factor de rugosidad R_f definido en las teorías de Wenzel y Cassie-Baxter. El aumento de la rugosidad que conlleva a un mayor valor del ángulo de contacto. Sin embargo, si se incrementa suficientemente el contenido de $CaCO_3$, la estructura de la rugosidad se modifica de modo que aparecen agrupamientos de partículas. La nueva superficie presenta nuevamente una morfología llana donde las burbujas de aire son difícilmente

atrapadas (f_S aumenta). En este último caso, el ángulo de contacto obtenido fue inferior.

En términos de resultados, se alcanzó un ángulo de contacto máximo de 160° empleando una solución con una concentración de 33,3% de nanopartículas (30 g de $CaCO_3$ por cada 10 g de PDMS y 50 g de acetato de etilo). Otra propiedad sumamente importante para evaluar si sería factible la puesta en obra del revestimiento hidrófobo es la resistencia a la abrasión medida con la resistencia al corte. En el trabajo de Zhiqing se observa que para una tensión de hasta 39,2 kPa el ángulo de contacto se mantiene constante. Por el contrario, cuando una tensión de 47 kPa fue aplicada, el ángulo de contacto se redujo a 148°. Aun así, el deterioro de la capa de PDMS y $CaCO_3$puede repararse fácilmente puliéndola con papel de vidrio. Este hecho permite recuperar el ángulo de contacto inicial.

2.4.2.2. Tratamientos para hormigones

Los tratamientos superficiales para alargar la vida útil del hormigón, protegiéndolo de los ataques químicos asociados al contacto con el agua, han sido ampliamente estudiados y utilizados. Algunos países, como Holanda o Alemania, incluyen en sus reglamentaciones este tipo de productos para tratar y prevenir la degradación de las estructuras de hormigón. Por estas razones, hay disponibles una gran cantidad de productos comercializados que podrían satisfacer la propiedad de no mojabilidad.

Existen diferentes aproximaciones de protecciones para combatir los ataques en el hormigón causados por el contacto de este con el agua.

- Recubrimientos y selladores: consisten en una barrera física (película que cubre toda la superficie). Su distribución comercial se hace en forma de pinturas.
- Agentes hidrófobos: materiales de protección capaces de hacer aumentar el ángulo de contacto entre el agua y la superficie donde se ha aplicado.
- Inhibidores de poros: exclusivos de la química del hormigón. Es el caso del silicato de sodio que penetra los poros y reacciona con la portlandita formando C-S-H. Este tipo de protecciones no actúan en la superficie, sino que están presentes en los poros.

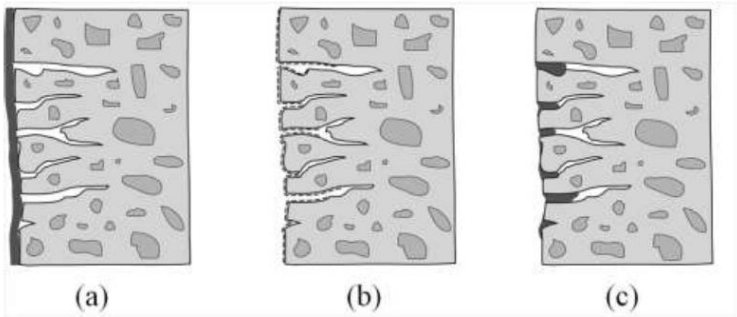


Figura 2-31: Grupos de tratamientos superficiales: (a) recubrimientos y selladores (b) agentes hidrófobos (c) inhibidores de poros (adaptación de Keer, 1992).

En un primer instante, de entre las distintas categorías de tratamientos, los agentes hidrófobos parecen ajustarse a los criterios a satisfacer.

Estos consisten en resinas de siliconas que forman enlaces químicos con los materiales base del hormigón. Actualmente las más utilizadas son los compuestos a base de silano, siloxano o una mezcla de ambos. Cabe remarcar que todos los químicos descritos anteriormente (DMDCS, PDMS y n-octyltriethoxysilano) también pertenecen a esta categoría de productos.

El silano (*silane*) está formado por moléculas pequeñas (estructura molecular de $1{,}0*10^{-6}$ a $1{,}5*10^{-6}$mm de diámetro) que disponen de un átomo de silicio. Su tamaño asegura una penetración eficaz, característica indispensable para la eficacia y continuidad del tratamiento superficial.

Por el contrario, el siloxano (*siloxane*) presenta una estructura molecular más grande(de $1{,}5*10^{-6}$ a $7{,}5*10^{-6}$mm de diámetro) y está formado por cortas cadenas de átomos de silicio, cuyas moléculas tienen grupos de alkoxy (orgánico) conectados.

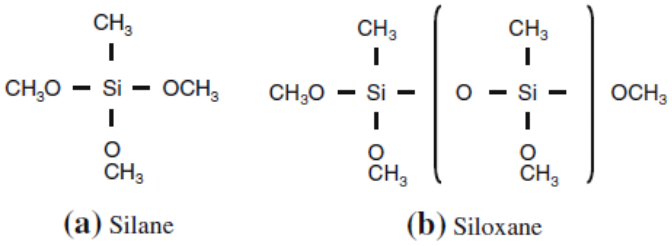


Figura 2-32: Estructura molecular de los silanos y los siloxanos (Medeiros et al., 2015).

La reacción que tiene lugar entre este tipo de materiales y el hormigón se presenta en superficie, cuando aparece un enlace entre el silicato (hormigón) y los silanos o los siloxanos.

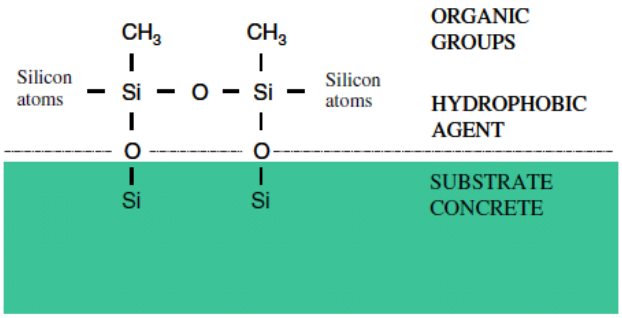


Figura 2-33: Enlace químico entre el agente hidrófobo y el hormigón (Medeiros et al., 2015).

El uso de silano y siloxano para el tratamiento de hormigones es sujeto de múltiples estudios. En la literatura consultada se detallan los resultados obtenidos para un amplio rango de productos. La mayor parte de estos tratamientos son distribuidos bajo forma de producto comercial. Este hecho, conlleva a una mayor rigidez para la investigación de la contribución del silano/siloxano en la mojabilidad del suelo. Se trata de composiciones químicas fijas donde no se pueden modificar sus concentraciones.

Las propiedades adquiridas por el hormigón (cuantificadas esencialmente con el ángulo de contacto y la cantidad de agua absorbida) no se pueden extrapolar para el presente estudio ya que la composición del material a proteger, así como su

morfología, son fundamentales para determinar el comportamiento del conjunto. Sin embargo, sí que es posible analizar los fenómenos que tienen lugar entre el agua y el agente hidrófobo.

Cabe destacar que los trabajos consultados exponen un mismo comportamiento frente a los distintos mecanismos de penetración del agua. Se ha demostrado que en medios saturados o en el caso de estar en contacto con agua a presión, los productos a base de silano y siloxano no presentan una mejora significativa de la cantidad de agua que penetra la muestra. En cambio, en el caso de medios parcialmente saturados, donde la absorción del agua tiene lugar a través de la succión capilar, los agentes hidrófobos consiguen impermeabilizar las superficies obteniendo ángulos de contacto elevados.

2.5. MOJABILIDAD DE SUELOS

2.5.1. TEORÍA DE LA MOJABILIDAD

La mojabilidad de un medio poroso seco o parcialmente saturado, como en los suelos, está definida por el equilibrio en la interfaz de los distintos estados (materiales) juntamente con la geometría de los poros. Si un suelo es hidrófobo el agua infiltrada ocupara los poros formando meniscos. Si se trata de un suelo hidrófilo, el agua recubrirá los granos formando una película. Aun que las fuerzas que interactúan sean las mismas, la teoría formulada en el capítulo anterior no es aplicable teniendo en cuenta que fue desarrollada para un sólido ideal. A su vez, un suelo es una superficie rugosa, heterogenia y anisótropa lo que implica una interpretación y adaptación de la teoría general.

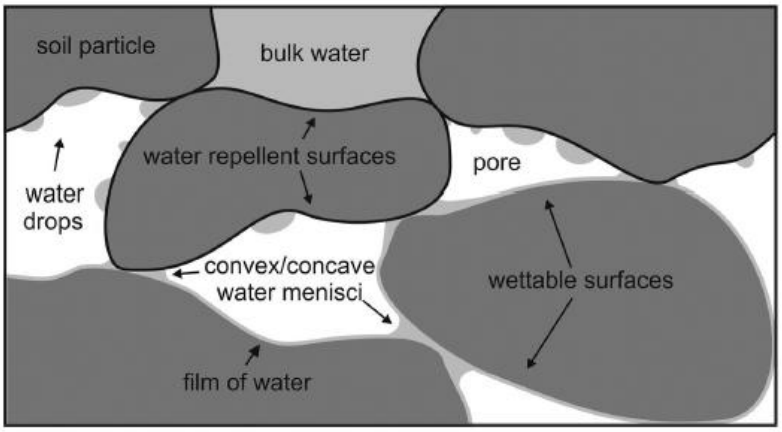


Figura 2-34 : Representción esquemática de la interacción del agua con partículas hidrófilas y hidrófobas (Bachmann et al, 2008).

Dichas características de los suelos llevan a que la mojabilidad sea aún un sujeto de estudio en la literatura debido a la dificultad de conocer el ángulo de contacto. Este parámetro ya no es intrínseco de un medio poroso debido a que está fuertemente influenciado por la geometría de las partículas (y de su conjunto) así como su naturaleza (heterogenia en la gran mayoría). Una particularidad a destacar es la presencia de materia orgánica. En la actualidad es ampliamente aceptado que su presencia en suelos naturales es una de las principales causas de aumento del ángulo de contacto. De este modo, el conjunto de todos los factores citados altera el equilibrio de la interfaz dando resultados distintos a los obtenidos en una superficie lisa y

homogénea. En otras palabras, en un medio poroso la histéresis del ángulo de contacto alcanza valores importantes.

En la literatura se ha estudiado la mojabilidad de los suelos así como la hidrología y su comportamiento mecánico. Cabe destacar que la gran mayoría de suelos tratados pertenecen al grupo de las arcillas, los limos y las arenas, pero en ningún caso se han tratado materiales con partículas superiores a 2mm. Teniendo en cuenta que el suelo de estudio presenta una granulometría más gruesa, se debe ser crítico con los resultados disponibles y su posible extrapolación. Se deben entender los fenómenos físicos presentes en ambos tipos de suelos para llevar a cabo una analogía. Un claro ejemplo es la hidrología y el tipo de flujo que aparecen en un medio poroso. En arenas mojables hablaremos principalmente de infiltración mientras que en arenas no mojables aparecerá un flujo superficial o “runoff”. Otro ejemplo es que para determinar si un suelo puede o no ser mojado, la técnica mayormente empleada es *Water Drop Penetration Time* (WDPT). Esta técnica mide el tiempo necesario de una gota para ser absorbida en lugar de determinar el ángulo de contacto del conjunto sólido-líquido. En nuestro caso, para clasificar una superficie como hidrófoba, no contemplaremos el conjunto sino una partícula debido al factor de escala entre la escollera y la arena. El interés del estudio en obtener una superficie hidrófoba viene dado con el objetivo de proteger la partícula.

Por otro lado, las técnicas y productos empleados para transformar a un suelo en hidrófobo se pueden aplicar a cualquier escala. Se trata de recubrir las partículas con un agente hidrófobo que asegurara la no mojabilidad del suelo mientras se mantenga un recubrimiento uniforme. Una única capa de moléculas hidrófobas puede asegurar una superficie mineral hidrófoba. Sin embargo, los compuestos tienden a ser absorbidos en grupos o a reaccionar con impurezas presentes en la superficie en el momento de la aplicación. Por este motivo varias capas pueden ser requeridas para asegurar un recubrimiento uniforme. Aun así, la cantidad de producto necesaria es pequeña. En gravas, cuya superficie específica es baja, se requerirán cantidades incluso inferiores (y por lo tanto concentraciones inferiores) que en los limos y las arenas de referencia.

2.5.2. TÉCNICAS PARA MEDIR LA MOJABILIDAD

Existen múltiples técnicas de medida de la mojabilidad de un suelo. Cada una está basada en un principio físico distinto que permite directa o indirectamente el cálculo del ángulo de contacto o de la tensión superficial critica (a partir de la cual un líquido moja un sólido específico).

Uno de los más extendidos en ingeniería de suelos es el *Water Drop Penetration Time test* (WDPT). Este método indirecto propone una clasificación de los sueles según el tiempo necesario de una gota para ser absorbida. Entre sus ventajas está el hecho que es de fácil aplicación y puede llevarse a cabo in situ. Por otro lado, es sensible a ángulos de entre 85° y 115°. Este rango viene definido por los límites temporales que determinan si una superficie es hidrófila o hidrófoba. El WDPT asegura que una superficie es hidrófila si el tiempo de absorción es menor a 2 segundos y que una superficie es hidrófoba si ese tiempo mayor a 3600 segundos.

Otro método clásico es el *Sessile Drop Method* (SDM). Esta técnica calcula directamente el ángulo de contacto estático utilizando la tangente en un microscopio

especial equipado de un goniómetro. La muestra es preparada en una placa de cristal donde una única capa de partículas homogéneas con la misma granulometría es colocada encima de una cinta adhesiva de doble cara. Los autores aceptaron los resultados como razonables (con una precisión de <6°) para partículas y agregados de tamaños finos. La limitación del tamaño de la muestra viene inducida por el hecho que el diámetro de las partículas de la muestra debe ser significativamente menor al diámetro de la gota.

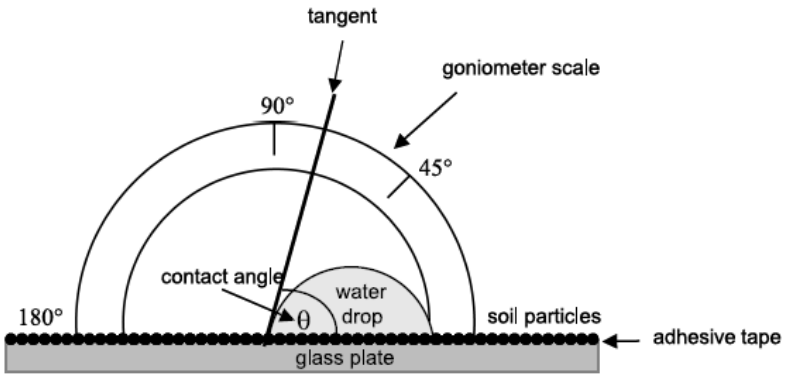


Figura 2-35: Esquema de la técnica SDM para la medición del ángulo de contacto estático (Bachmann et al., 2000).

El Capillary Rise Method (CRM) se basa en un principio físico completamente distinto para calcular el ángulo de contacto de avance. Aquí, la cinética del proceso de mojado por capilaridad, formulada por Lucas-Washburn, sirve de base semi-empirica para la determinación del ángulo de contacto. La ecuación general (sin considerar el efecto de la gravedad) se expresa como:

$$x^2 = \frac{r\gamma cos\theta}{2\eta} t \qquad (27)$$

donde x (m) representa la altura penetrada por el líquido, t (s) es el tiempo, r (m) es el radio efectivo del capilar (m), γ (mN m^{-1}) y η (kg m^{-1} s^{-1}) la tensión superficial y la viscosidad del líquido respectivamente, y θ(°) el ángulo de contacto entre el líquido y la pared.

De acuerdo con Marmur (2003), la ecuación es válida para muestras cortas donde el efecto de la gravedad es negligible. Generalmente la evolución de la masa del sistema (w (kg)) se puede medir con más precisión que la altura de muestra mojada, quien está sujeta a apreciaciones ópticas. De este modo la ecuación (27) puede ser reescrita como:

$$w^2 = K\frac{\rho^2\gamma cos\theta}{2\eta} t = mt \qquad (8)$$

donde K (m^5) es una constante en función de la estructura de los poros (p.e. porosidad, radio y continuidad de los poros) y ρ (kg m^{-3}) es la densidad del líquido. El modelo puede aplicarse usando una microbalanza. Las constantes r y K no se pueden determinar a priori con lo que un líquido de referencia con θ=0° debe ser usado (p.e. n-hexano o cyclohexano).

La ecuación (8) sugiere una relación lineal entre w^2 y t cuyo pendiente m viene determinado por el ángulo de contacto y el líquido empleado. Para calibrar el modelo (determinar las constantes r o K) se recurre a un agente que presenta una mojabilidad completa ($\cos\theta$=1). Posteriormente, el experimento se lleva nuevamente a cabo obteniendo pares de valores w-t. Sustituyendo dichos valores junto con las propiedades físicas del agua (o de cualquier líquido de interés) la ecuación queda en función de una única variable ($\cos\theta$).

Entre las limitaciones de este método destacan el ámbito de aplicación exclusivamente en materiales hidrófilos (θ<90°) y que el ángulo medido corresponde con el ángulo de avance. Además, a nivel práctico requiere un segundo líquido con mojabilidad completa para la calibración.

Vistas las distintas restricciones de los métodos estándares, ya vengan caracterizadas por el tamaño de la muestra o por la naturaleza del material, queda clara la complejidad que aparece en el cálculo del ángulo de contacto y sus limitaciones. De acuerdo con el principio físico que rige el método, la mayoría de técnicas son solo válidas o bien para materiales hidrófobos o bien para materiales hidrófilos. Bachmann et al. (2003), desarrollaron dos nuevas metodologías quienes se adaptan a un rango más amplio de mojabilidades. Se trata del *Wilhelmy Plate Method* (WPM) y del *Modified Capillary Rise Method* (MCRM). Estos métodos fueros probados en 24 suelos (arenas, limos y arcillas) y cuyos resultados fueron comparados con los métodos estándares SDM y WDPT. Se encontró que los valores de los ángulos de contacto de avance calculados se acordaban bien en un rango de 0° a 142°.

El MCRM permite ampliar el rango de mojabilidades del CRM (inicialmente de 0° a 90°) a un rango teórico de 0° a 180°. Además, permite obtener información adicional como la energía superficial critica (θ=0°) o la correspondiente a θ=90°. Para ello propone usar mezclas de metanol-agua con varias composiciones. El procedimiento es exactamente el mismo que para el método CRM convencional pero ahora usando distintos líquidos de calibración con varias tensiones superficiales conocidas. Bachmann et al. (2003) usaron la relación lineal propuesta por Zisman:

$$\cos\theta = b_0 + b_1\sigma_{lv} \qquad (28)$$

Donde b_0 y b_1 son parámetros de calibración. Se resuelve dibujando la ecuación anterior (gráfico de Zisman) y posteriormente resolviendo el método gráfico.

El WPM también ha sido adaptado para ser aplicado en ingeniería de suelos. Se precisa una placa fina, conectada a una balanza electrónica, que se va a sumergir progresivamente en el líquido de estudio. La muestra se dispone en una única capa de partículas homogéneas con la misma granulometría encima de una cinta adhesiva de doble cara. A medida que se sumerge la placa tres principales fuerzas actúan en la placa; fuerzas gravitatorias, fuerzas de flotabilidad y fuerzas en el menisco. La fuerza de flotabilidad F_b incrementa linealmente con la profundidad de inmersión. La fuerza de mojabilidad F_w, que aparece con la presencia del menisco, en un primer momento contribuye incrementando la fuerza total Ft (en inmersión parcial, θ<90°). Seguidamente, decrece cuando la placa se sumerge por completo.

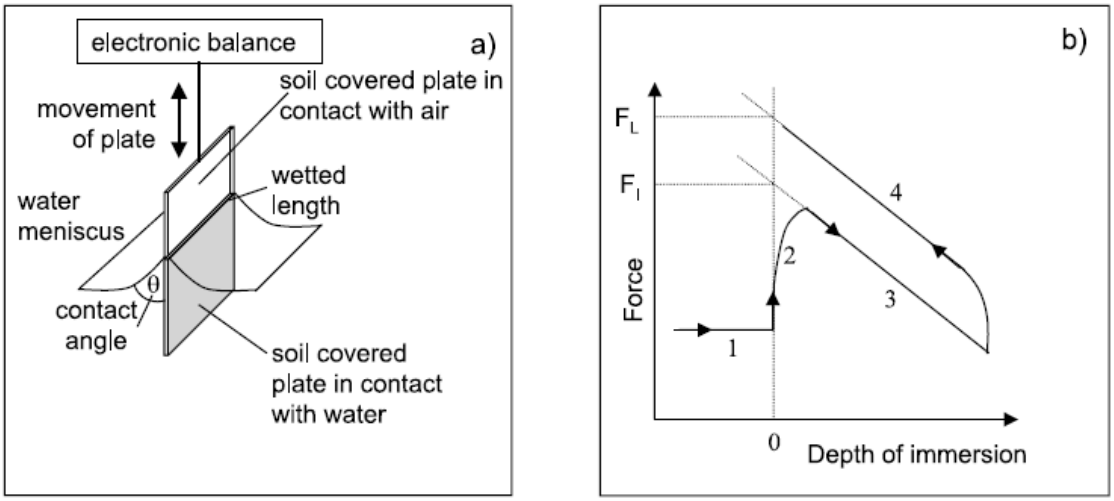


Figura 2-36: Método WPM para medir ángulos de contacto: (a) representación esquemática de la configuración del experimento i (b) las fuerzas que actúan en la placa durante la inmersión (FI) o durante el levantamiento (FL). Definición de las etapas 1 a 4 citadas en el texto (Bachmann et al., 2003).

Las cuatro etapas son ilustradas en la figura 2-36. Etapa 1: muestra fuera del líquido; etapa 2: la placa entra en contacto con el líquido; etapa 3: inmersión de la placa (la fuerza de flotabilidad aumenta de modo que conlleva una disminución de las fuerzas medidas por la balanza); etapa 4: levantamiento de la muestra fuera del líquido. La etapa 3 está regida por el ángulo de avance mientras que la etapa 4 por el ángulo de retroceso. En cualquiera de las etapas la fuerza total Ft se expresa como:

$$Ft = W - F_b + F_w = W - V\rho g + l_w \gamma_{lv} \cos(\theta) \qquad (29)$$

donde W (kg) es la masa de la muestra, V (m3) i l_w (m) el volumen sumergido i la longitud mojada de la muestra respectivamente i γ_{lv} (mN m^{-1}) la tensión superficial del líquido. Si la balanza se tara antes de empezar a sumergir la muestra el ángulo de contacto se puede calcular como:

$$\cos(\theta) = \frac{F_t + V\rho g}{l_w \gamma_{lv}} \qquad (30)$$

Así pues, $\cos(\theta)$se obtiene de la regresión lineal de la fuerza de mojabilidad F_w a lo largo del tiempo.

La motivación del WPM, comparado con los otros métodos utilizados en la literatura, es que permite el cálculo rápido tanto del ángulo de avance como el de retroceso. El rango de aplicación teórico va de los 0 ° a los 180°. Más adelante, con la aceptación de dichos nuevos métodos, Bachmann et al. (2009) volvieron a comparar los resultados concluyendo que la velocidad y la profundidad de sumersión influyen significativamente en los ángulos dinámicos. Sin embargo, el valor estático aproximado con la fórmula de Mamur permanece constante. Como principal desventaja señalar que el tamaño de la muestra debe tener una granulometría fina para corresponderse con las dimensiones del experimento.

Bachmann et al. (2003 y 2009) compararon los resultados de los distintos métodos aplicados en ingeniería de suelos. Demostraron una buena correspondencia de los resultados medidos por WPM y SDM. El hecho de que en el WPM se contemple una

superficie relativamente superior no indujo ninguna mejora en la sensibilidad. Por otro lado, los ángulos obtenidos con CRM difieren significativamente de los ángulos asociados a otros métodos. Esta diferencia podría ser atribuida a una dependencia temporal de la mojabilidad.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

3.1.1. PIZARRA CUARCÍTICA

El primer material ensayado fue una pizarra cuarcítica del Cambríco que provenía de un afloramiento del río Pancrudo en la provincia de Teruel. Dicho afloramiento fue usado como cantera para la construcción de la presa de regulación en el río Jiloca (Teruel). Además de ser usado como material de construcción, también se ha utilizado como material de estudio en numerosos trabajos desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB). Son ejemplo los trabajos de Oldecop y Alonso (2001), Boiga (2002), Chávez (2004), Hueso (2004), Ramon (2006), y Cañavate (2010).

Al ser un material usado en numerosos estudios, sus propiedades son bien conocidas. Los primeros autores en describir el material fueron Oldecop y Alonso (2001). Las partículas son alargadas y planas lo que demuestra la presencia de una dirección principal. La composición mineralógica se ensayó con la técnica de difracción de rayos X y se obtuvo la presencia de cuarzo, moscovita, cinocloro, calcita y dolomita. En el mismo trabajo se definieron sus propiedades ingenieriles que se ven resumidas en la tabla siguiente:

Propiedad	Valor medio	Rango
Resistencia a compresión simple (MPa)	20,5	14,2 - 31,9
Peso específico (ASTM C97-90) (Mg/m^3)	2,754	-
Absorción de agua (ASTM C97-90) (%)	1,356	-
Porosidad (%)	8	6,3 – 11,8

Tabla 3-1: Propiedades de la pizarra del río Pancrudo.

Para la curva de retención de la pizarra cuarcítica se aplicaron tres técnicas: equilibrio de vapor en altas succiones (>1 MPa), traslación de ejes (con aire a presión) para valores intermedios de la succión (0,01- 0,5 MPa) y, para valores muy pequeños (< 0,01 MPa), la técnica del tensiómetro donde se inducen presiones negativas del agua a partir de una columna de agua. La forma de la curva de retención permite dar información del tamaño y la forma de los poros, así como de las grietas de las partículas.

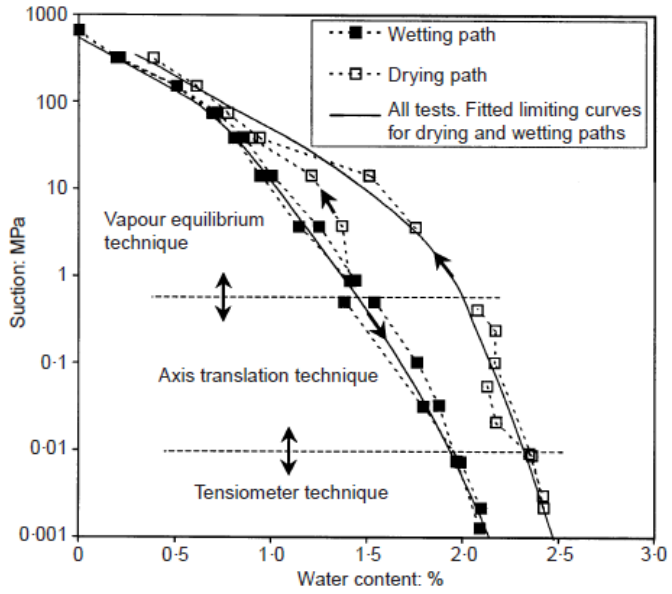


Figura 3-1 : Curva de retención de la pizarra del río Pancrudo. Datos experimentales y curvas ajustadas a las ramas de secado y mojado. (Oldecop y Alonso, 2000)).

3.1.2. GRAVA CALIZA

El segundo material de estudio consiste en un balasto calizo procedente de una cantera en el macizo del Garraf en la provincia de Barcelona. Su extracción se hace por voladura y seguidamente, se tritura hasta alcanzar el tamaño deseado. Las partículas obtenidas presentan un tamaño regular, sin una dirección dominante, con los cantos angulosos y la superficie rugosa.

El material utilizado en el presente estudio se encontraba disponible en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas del Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSECCPB. Este mismo material ha sido usado en varios proyectos de investigación llevados a cabo en el Departamento del Terreno de dicha escuela.



Figura 3-2: Capazo con gravas calizas disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas.

Las propiedades del material fueron definidas por Alonso et al. (2016) y se encuentran resumidas en la tabla siguiente:

Propiedad	Grava caliza
Resistencia a compresión simple (MPa)	67-146
Peso específico (Mg/m^3)	2,76
Absorción de agua (ASTM C97-90) (%)	0,38
Porosidad (%)	1

Tabla 3-2: Propiedades de la grava caliza del Garraf.

El mismo autor obtuvo la curva de retención con dos técnicas distintas. Para succiones bajas (<2,5 MPa), se empleó la técnica de traslación de ejes con piedras porosas de cerámica con un valor de entrada de aire superior a 2,5 MPa. Inicialmente se sitúa la muestra encima de la piedra porosa saturada e, incrementando la presión de aire, se induce un cierto valor de la succión. Para succiones elevadas, de hasta 400MPa, se siguió la técnica de transferencia de vapor. En este caso la muestra se dispone en un sistema cerrado y con unas condiciones de humedad relativa impuestas por una solución salina. La muestra alcanza el equilibrio una vez que su succión coincide con la humedad relativa del ambiente.

La figura 3-3 muestra las curvas de retención para ambos materiales.

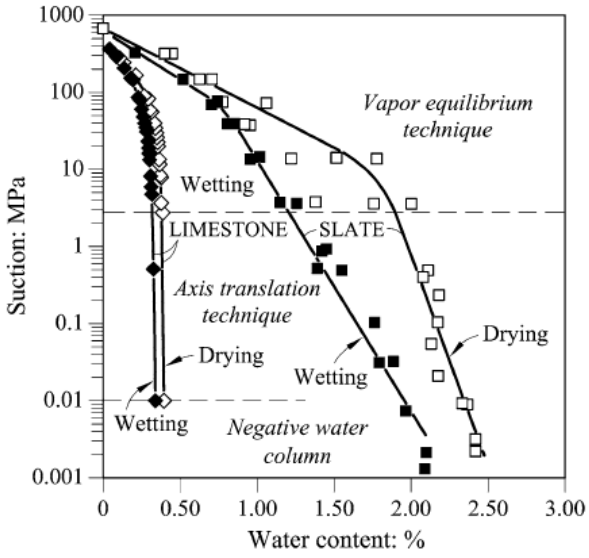


Figura 3-3: Curva de retención de la caliza del Garraf. Datos experimentales y curvas ajustadas a las ramas de secado y mojado. (Alonso et al., 2016).

La figura anterior muestra que la pizarra cuarcítica adquiere un contenido de agua mayor. La forma de las curvas de retención es función directa tanto de la macroestructura de la matriz como de la estructura de los granos. En matrices con elevada porosidad, si además se encuentra una conexión entre los poros, la cantidad de agua retenida será mayor. Así mismo, la forma de los poros es de gran interés. Si se hace la analogía de los poros con tubos capilares, cuando menor sea el radio de estos, mayor será la ascensión capilar. En el caso de estudio, las partículas de grava caliza tienen una forma piramidal sin ninguna dirección predominante por lo que los poros tienen una forma poligonal más cercana a una esfera. Este hecho, tal y como lo

muestra la figura 3-4, explica la gran diferencia entre las curvas de retención de la grava caliza y la pizarra cuarcítica.

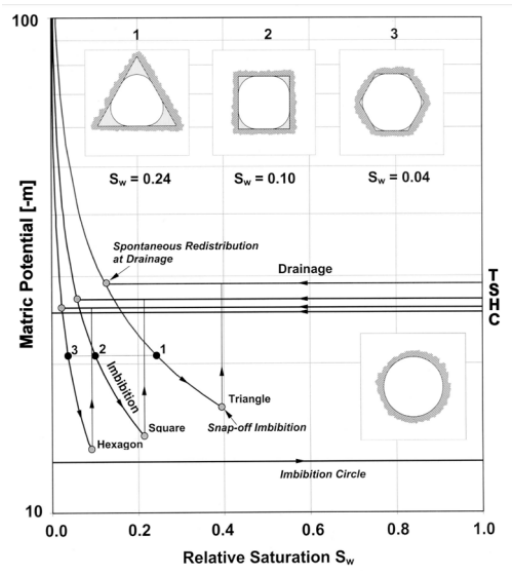


Figura 3-4 : Ascensión capilar en poros con diferentes secciones (Tuller y Or, 2003).

3.2. AGENTE HIDRÓFOBO

Tras la comparación de los diferentes productos utilizados en la literatura se tomó la decisión de trabajar con el Dimethyldiclorosilano (DMDCS). Este compuesto es el más extendido en el estudio de la hidrofobicidad en suelos además de presentar una aplicación fácil y directa. Una condición importante en la toma de decisiones fue la toxicidad del producto utilizado. Tras comparar las recomendaciones de todas las opciones disponibles, se llegó a la conclusión que el riesgo era el mismo para todos los productos. Además, el profesor Enrique Romero se tuvo el placer de hablar con Ng, y discutir sobre el procedimiento seguido para la aplicación del DMDCS. Otro punto importante a la hora de seleccionar el producto fue el hecho de utilizar un compuesto químico puro frente a un producto final comercializado. Este hecho llevó a desestimar los distintos productos disponibles en el mercado para el tratamiento del hormigón. Esta decisión, implicando una complejidad añadida a la hora de tratar el material, se tomó para disponer de mayor flexibilidad con la formulación y las concentraciones de agente hidrófobo a utilizar.

Producto	Líquido inflamable	Irritación cutánea	Irritación ojos	Irritación vías respiratorias	Protección
DMDCS	2	1 (Aldrich) - 2 (otros)	2	3	Guantes, gafas, máscara
n-octyltriethoxysilane	-	2	2	Puede causar	-
Etanol	2	X	2	Puede causar	Gafas, máscara
Glassclad18	2	2	2	Puede causar	Guantes, gafas, máscara

Tabla 3-3: Comparativa de la toxicidad de los componentes químicos de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008.

El producto finalmente utilizado fue Dimethyldiclorosilano (DMDCS), composición $(CH_3)_2SiCl_2$ de, la marca Sigma-Aldrich. Teniendo en cuenta los valores de concentraciones disponibles en la bibliografía (Ng y Lourenço, 2015), se consideró oportuno tratar las muestras con una concentración del 0,05% en masa (equivalente a 4,67 ml kg^{-1} si transformamos los 0,5 kg $_{DMDCS}$ kg^{-1} $_{gravas}$ con las propiedades del agente hidrófobo descritas por el fabricante). Las cantidades empleadas por los distintos autores son muy dispares y están comprendidas entre $5{,}5 \cdot 10^{-3}$ ml kg^{-1} y 28 ml kg^{-1}. Este hecho, llevó a considerar los resultados del estudio de Ng y Lourenço en donde se analizaba el efecto de modificar la concentración en el ángulo de contacto. Sabiendo que el material de estudio tiene una superficie específica significativamente inferior a las arenas utilizadas por Ng, en teoría, la concentración necesaria debería ser menor. Aun así, por una razón de comodidad a la hora de trabajar con el producto (las cantidades requeridas son muy pequeñas) y junto con el hecho de que se disponía de suficiente DMDCS, se optó por no intentar optimizar el producto sino más bien asegurar la no mojabilidad del material una vez tratado.

El material tratado fue la pizarra del río Pancrudo con diámetros comprendidos entre 20 y 30 mm. Las partículas fueron destinadas a los ensayos edométricos (E4PT-D30-CDI y E5PT-D30-ICD) y a los ensayos de compresión uniaxial entre placas de acero. En un primer instante se realizó una prueba con una pequeña muestra de 410 g (1,91 ml de DMDCS) para comprobar la metodología llevada a cabo durante el tratamiento. Tras verificar la no mojabilidad de las partículas se procedió a tratar mayores cantidades correspondientes a las muestras utilizadas en los ensayos edométricos E4PT, E5PT, E6PT y E7PT. Para ello se siguió el mismo procedimiento detallado en el apartado 3.4.1., pero esta vez, con cantidades superiores (M_2= 2,7 kg con V_{DMDCS} =12,61 ml, M_3= 2,8 kg con V_{DMDCS} = 13,08 ml, M_4 = 2,7 kg con V_{DMDCS} =12,61 ml, M_5 = 2,8 kg con V_{DMDCS} = 13,08 ml).



Figura 3-5: Muestras M2 y M3 secandose para ser tratadas con DMDCS.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

3.3.1. EQUIPO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL DE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO

Los ensayos de compresión uniaxial de partículas irregulares de roca entre dos placas de acero se llevaron a cabo en un equipo especialmente diseñado para ello. El equipo es el encargado de acomodar la muestra y de transmitir la tensión. Para ello, se acopla a una prensa quien genera la fuerza aplicada a través de los contactos entre las distintas superficies.

El equipo de compresión uniaxial consta de dos placas de acero donde se coloca la partícula. Estas dos superficies cilíndricas están unidas a las bases superior e inferior. La base superior consta de un prisma de acero con cuatro orificios circulares. Los dos traseros corresponden a las guías de las barras verticales que sirven de unión entre los dos mecanismos mientras que los dos frontales tienen como función la sujeción del aparato de toma de datos (LVDT). La base inferior es similar a la superior pero presenta los elementos inversos a los de la tapa superior. Por un lado, dispone unidas sólidamente las barras verticales que funcionan como guía en el movimiento vertical de ambas bases. Este sistema garantiza que el movimiento relativo entre ambas bases sea completamente vertical. Por otro lado, en la parte frontal, dispone de dos tornillos de cabeza plana donde se coloca en contacto la cabeza del LVDT.

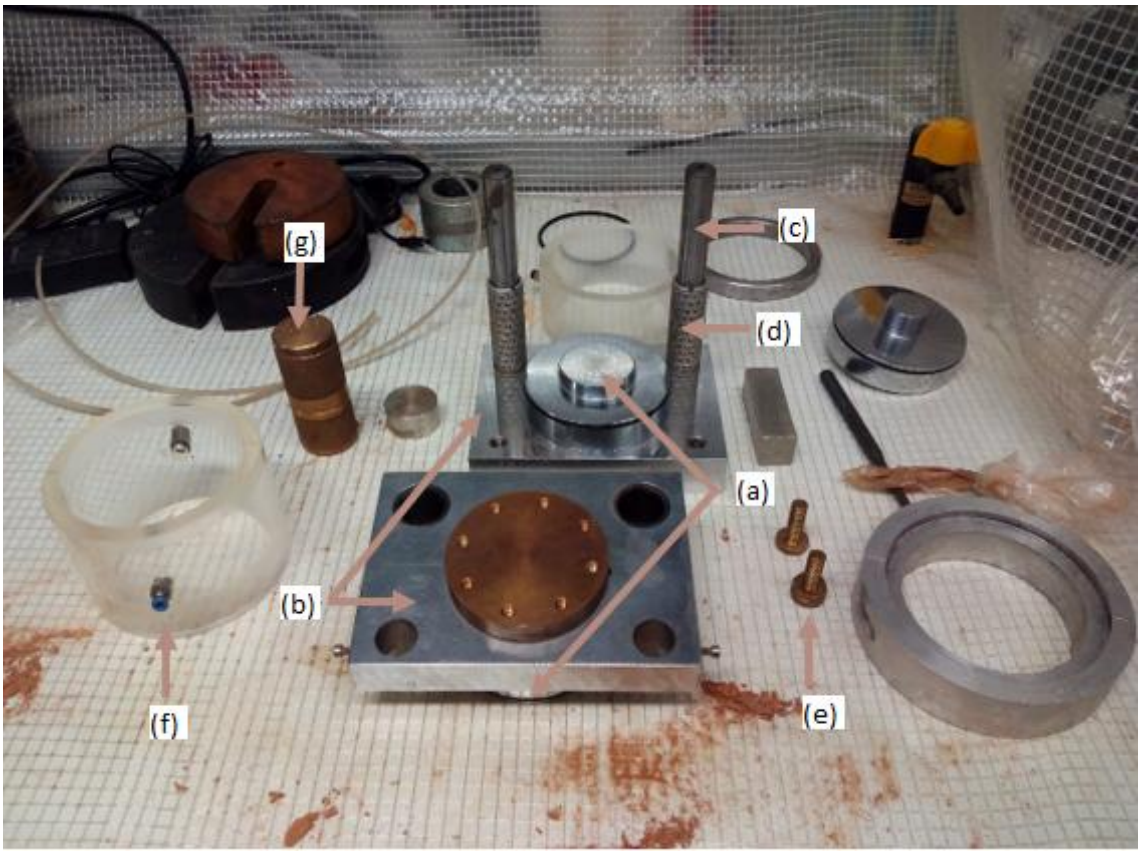


Figura 3-6 : Elementos del quipo de compresión uniaxialde una partícula irregular de roca entre dos placas de acero. (a) Placas de acero, (b) bases, (c) barras verticales, (d) guías, (e) tornillos, (f) anillas herméticas y (g) peón.

Además, para que el deslizamiento de la tapa superior sea suave, se colocan dos cilindros huecos en las barras verticales. Estos cilindros disponen de unos relieves presionables permitiendo así la fijación con la base superior. También se dispone de dos anillas transparentes que, junto con las tóricas, consiguen cerrar herméticamente el volumen comprendido entre ambas placas de acero. Por último, se dispone de un peón formado por dos piezas enroscables. Esta última pieza es una pieza de seguridad para mantener las dos placas de acero a una cierta distancia mientras se coloca la partícula.

Para montar el equipo se deben introducir las guías cilíndricas en los orificios traseros de la tapa superior hasta que las guías queden fijas. A continuación, se coloca el peón encima de la base inferior para que actúe como tope. Seguidamente se introducen las barras verticales en las guías y se acompaña la base superior hasta el contacto con el peón. Por último, se enroscan los tornillos de cabeza plana donde se apoyará el LVDT.

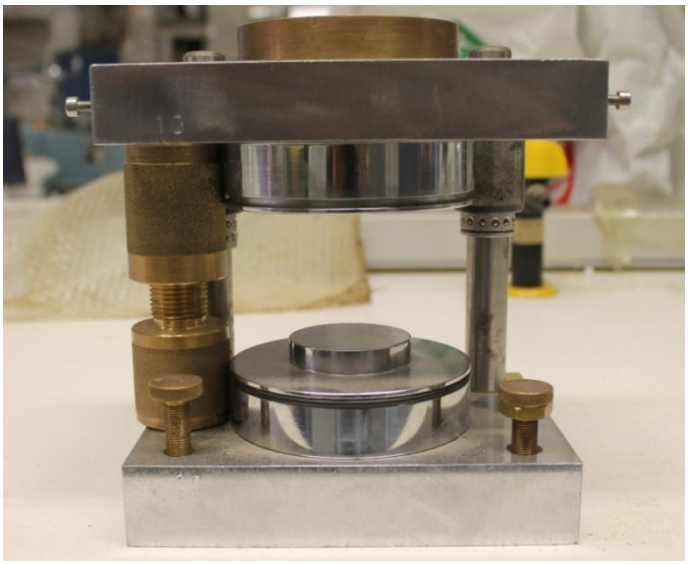


Figura 3-7: Equipo de compresión uniaxial montado.

Para la realización del ensayo es necesario colocar el equipo en otro equipo quien transmita la tensión. En el presente estudio se trabajó con una prensa. En la parte superior disponía de una placa de carga para registrar la fuerza aplicada con kg como unidades. El dispositivo funciona gracias a la base móvil de la prensa quien se desplaza verticalmente comprimiendo las dos placas de acero. El control del movimiento se consigue introduciendo la velocidad de avance en mm/min.

Para la toma de datos, el programa Tritest 1000 registra las lecturas tanto de desplazamientos (LVDT) como de la carga aplicada (placa de carga) para cada instante.



Figura 3-8: Prensa con equipo de compresión uniaxial.

3.3.2. EDÓMETRO ϕ=150 MM

Los ensayos de compresibilidad de las escolleras se llevaron a cabo con un edómetro de tipo Rowe. Las dimensiones del compartimento donde se coloca la muestra son de un diámetro interior de 150 mm y una altura de 150 mm o bien 190 mm según en el equipo.

El equipo consiste en un anillo edométrico de acero inoxidable montado encima de un cabezal inferior fijo. El cabezal superior es móvil y se encuentra unido a un vástago encargado de hacer de guía del desplazamiento vertical. Para medir las deformaciones verticales, un LDVT con una carrera máxima de 13 mm es instalado en un marco indeformable con la punta apoyada en el vástago.

La parte superior del anillo edométrico está cerrada por una tapa fijada con seis tornillos capaces de resistir a 2,8 MPa de presión. La cámara formada entre el cabezal superior y la tapa está recubierta por una membrana de látex que permite aislar la muestra. Es a través de esta cámara que se aplica la carga con la inyección de aire a presión.

El sistema de inundación consiste en un circuito formado por un depósito unido al vástago y al cabezal inferior con tubos de goma. Ambos cabezales son drenantes para permitir la circulación de agua/aire. Para evitar la migración de finos, el agua se introduce por la parte inferior del edómetro. Para los ensayos con saturación de la probeta mediante vapor de agua se modificó el circuito de inundación pasando a un circuito de aire. Ahora, se conecta al depósito del circuito una bomba aireadora que permite oxigenar el agua. Una vez alcanzado el equilibrio, el vapor de agua generado es bombeado hacia la válvula inferior del edómetro. A la salida del edómetro, se cierra el circuito conectando el tubo de la salida del vapor al aireador. La humedad del vapor

de agua se puede medir mediante la colocación temporal de un higrómetro en el depósito.



Figura 3-9: Elementos del edómetro. (a) Anillo edométrico, (b) base inferior, (c) cabezal superior, (d) anillas de asiento de la membrana, (e) membrana de látex unida al vástago y a la tapa, (f) marco y (g) tornillos.



Figura 3-10: Circuito de vapor de agua. En amarillo entrada al edómetro, en marrón salida del edómetro y en verde inyección de aire.

Se dispone de dos equipos funcionales completos con distintos sistemas para la toma de desplazamientos. Un primer equipo está equipado con un comparador que aprecia 0,01 mm de modo que la toma de datos se hace de forma manual. El otro equipo dispone de un sistema de adquisición de datos por ordenador mediante el cual se registran las lecturas de desplazamientos verticales medidas por el LVDT. En ambos casos el comparador y el LVDT se colocan solidariamente al marco montado alrededor del edómetro son la punta apoyada en el extremo del vástago.

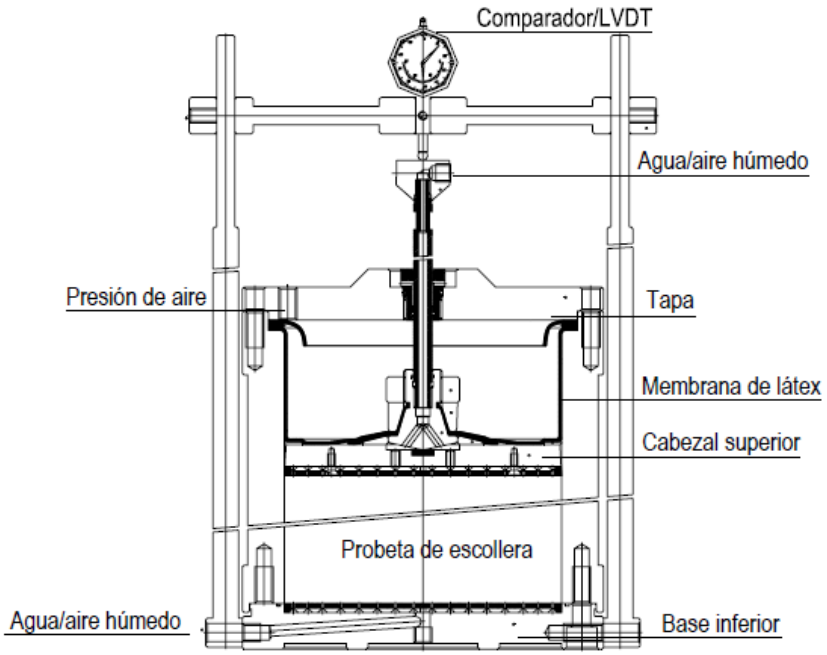


Figura 3-11: Sección y elementos del edómetro utilizado (Cañavate, 2010).

3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.4.1. TRATAMIENTO HIDRÓFOBO

Para conseguir el revestimiento con el agente hidrófobo, se trabajó en el Laboratorio la sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB). El tratamiento se llevó a cabo en dicho departamento debido a que sus instalaciones están mejor equipadas para la manipulación de químicos. El procedimiento seguido consiste en, en un primer instante, limpiar la muestra con agua para eliminar los finos o cualquier otra materia que estuviera adherida en superficie y seguidamente dejarla secar. A continuación, se trabaja en una campana extractora de humos para la eliminación del HCl gas que se produce durante la reacción del DMDCS con el agua desionizada. Se introduce el agua necesaria para saturar la muestra en el recipiente donde se va a tratar (desecador), a continuación, con la ayuda de una inyección se reparte el volumen de DMDS necesario en función de la masa de la muestra. Se deja reaccionar unos segundos y se le agregan las partículas de escollera.



Figura 3-12: Muestra de prueba (410g) sumergida en el DMDCS (1,91 ml) después de reaccionar con el agua desionizada dentro del desecador.

Es importante verificar que todas las superficies estén sumergidas para que el agente hidrófobo alcance todas las caras de las partículas. Seguidamente se trasladaron las muestras con la ayuda de un desecador y se dejaron sumergidas dos días. Finalmente se retiró el líquido excedente y se dejaron secar en el ambiente.

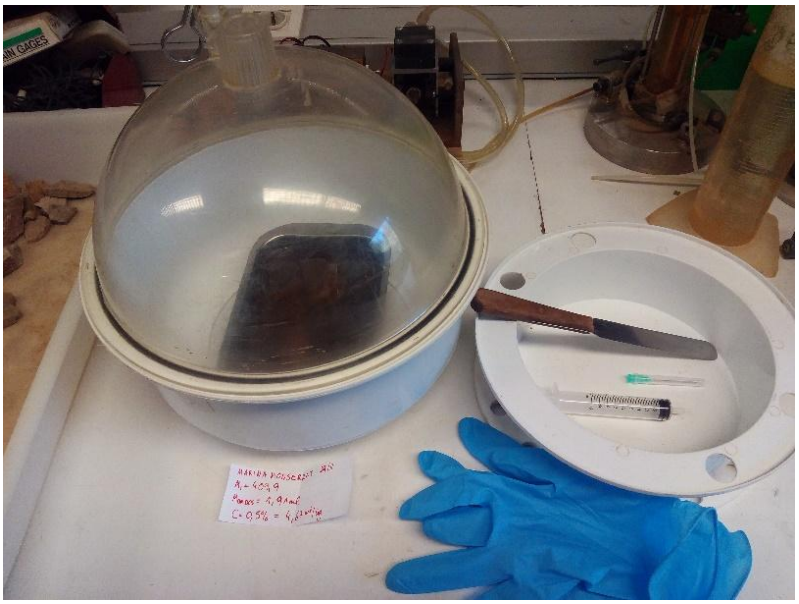


Figura 3-13: Primera muestra de ensayo después de ser tratada con DMDCS. Instrumentos utilizados para el tratamiento.

3.4.2. COMPRESIÓN UNIAXIALDE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO

Esta tipología de ensayos se llevó a cabo para el estudio del comportamiento frente a la rotura de una partícula individual. En total se realizaron 40 ensayos pudiéndose clasificar en cuatro grupos de 10 ensayos según las características del material y la succión aplicada. Según las características del material, se distinguen dos grupos; las pizarras del río Pancrudo en su estado natural y las mismas pizarras con un recubrimiento hidrófobo a base de DMDCS. Por otro lado, dichas partículas se ensayaron en condiciones secas o en condiciones saturadas.

Se utilizó un equipo de compresión uniaxial especialmente diseñado para la rotura de partículas aisladas. El procedimiento seguido consiste en introducir inicialmente la partícula entre las dos placas de acero del equipo y, seguidamente, introducir el equipo en una prensa con control de carga.

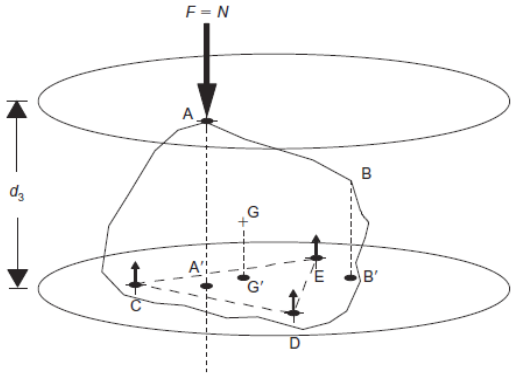


Figura 3-14 : Esquema del contacto entre una partícula irregular y las placas de acero del equipo de compresión uniaxial (Carraveta y O'Sullivan (2012)).

Una vez iniciado en proceso de compresión, las tensiones se transmiten de la prensa a las placas de acero del equipo y estas, transmiten los esfuerzos de forma puntual en los contactos entre las placas de acero y las partículas. Las partículas presentan una forma irregular natural debida a que fueron obtenidas por machaqueo de grandes bloques. Esta forma irregular entre las caras de una misma partícula y a su vez, entre distintas partículas hace que el área de contacto sea distinta en cada contacto y, como consecuencia, los esfuerzos aplicados en este.

La toma de datos se hace mediante la instalación de un transductor LVDT unido sólidamente a la placa superior y apoyado en la placa inferior. Para cada instante de tiempo hasta la rotura, la carga aplicada va aumentando de forma automática a una velocidad v predeterminada. A su vez, para cada carga aplicada se registra el desplazamiento observado.

3.4.2.1. Partículas ensayadas

Las partículas ensayadas a compresión uniaxial se obtuvieron exactamente de la misma forma que las partículas utilizadas en los ensayos edométricos E_iP-D30 y E_iPT-D30. Se trata de gravas de pizarras procedentes del río Pancrudo con tamaños comprendidos entre los tamices UNE 20 y UNE 30 mm.

Una parte del material utilizado disponía de un recubrimiento hidrófobo a base de DMDCS. Las partículas con dichas características procedían del excedente de las muestras tratadas (M1, M2 y M3) tras haber separado las cantidades destinadas a los ensayos edométricos E4PT y E5PT. Con todo el material disponible se escogieron partículas con forma similar de ambas naturalezas para minimizar, dentro de lo posible, los efectos de la forma. Tal y como se verá más adelante, se ha asociado un mismo número a las partículas equivalentes, hidrófobas y hidrófilas. Los ejemplares ensayados corresponden a las partículas 1-20, correspondiendo a 40 en total. Por otro lado, cabe destacar que, al tratarse de un material con presencia de planos de estratificación gran parte de las superficies son planas. En la figura 3-15 se muestran las partículas ensayadas.



Figura 3-15 : Planta de las partículas similares escogidas para los ensayos de compresión uniaxial. Derecha: partículas naturales e izquierda: partículas hidrófobas. Numeración empezando en el 1, de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba.

Los ensayos con ambos tipos de partícula se llevaron a cabo en dos condiciones en relación a la succión aplicada. Por un lado, un estado “seco” correspondiente a las condiciones ambientales del laboratorio y otro estrado “mojado” correspondiente a un valor de la succión igual a cero. Para el caso seco, las partículas se dejaron en equilibrio con las condiciones ambientales del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas. Cabe destacar que la humedad se mantiene entre 50-65%, a una temperatura de 19-22 ºC lo que corresponde a una succión aproximada de 65 MPa. Las condiciones mojadas se consiguieron sumergiendo las partículas en agua durante el ensayo.

3.4.2.2. Preparación de las muestras

Después de montar el equipo de compresión uniaxial se prosigue a introducir la partícula a estudiar entre las placas de acero. Para ello, se debe mantener el peón colocado en una posición suficientemente alta para poder introducir la partícula. A continuación, se desciende paulatinamente el peón hasta asegurar el contacto entre la partícula y ambas placas.

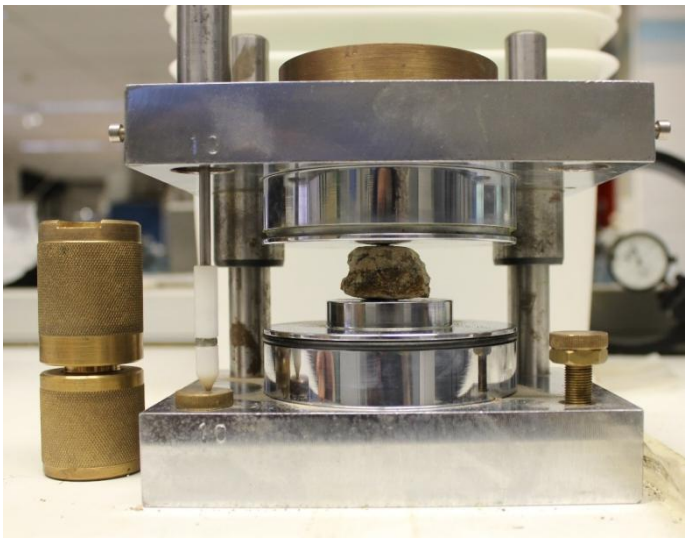


Figura 3-16 : Partícula colocada en el equipo antes de ser ensayada.

Para los ensayos mojados se coloca el anillo debidamente sellado y se introduce agua desionizada en su interior. Por razones de seguridad, aunque no se saturase la partícula, este se colocó igualmente para protegerse ante los pequeños trozos de partícula que pudieran dispararse durante la rotura.

Seguidamente se coloca el aparato de medida de los desplazamientos en uno de los orificios frontales y se ajusta hasta su fijación.

El conjunto se coloca encima de la base de la prensa. Para ajustar la altura fue necesario ubicar dos pesas encima de la base. Seguidamente se sube la base de la prensa hasta asegurar el contacto entre la placa de carga de la prensa y la base superior del equipo de compresión uniaxial.



Figura 3-17 : Prensa con equipo de compresión uniaxial antes del inicio del ensayo.

La velocidad de avance se fijó en 0,5 mm/min y la toma de datos todos los 0,5 segundos. El valor bajo de los parámetros permite describir con mayor detalle la rotura de la partícula. Una vez iniciado el ensayo se comprime la muestra hasta su rotura (proceso rápido de 4 min). Se considera que se ha alcanzado la rotura cuando la carga empieza a descender, momento que en la mayoría de casos va acompañado de un ruido de rotura.

3.4.2.3. Nomenclatura de los ensayos

Para trabajar de forma ordenada se le asignó un nombre a cada partícula ensayada. Las 40 partículas ensayadas se distinguieron en cuatro grupos según si dispone o no de recubrimiento hidrófobo junto con las condiciones de saturación del ensayo. Se asignaron las siglas TS, TM, SS y SM a las cuatro categorías. El primer índice indica si la partícula ha sido o no tratada (T = tratada y S = sin tratar). El segundo índice indica las condiciones en las que se llevaron a cabo el ensayo de compresión uniaxial (S = seco y M= mojado). Además, cada partícula lleva un número asociado en función de su forma. Dicha numeración (del 1 al 20) se establece tanto en las partículas hidrófobas como hidrófilas teniendo en cuenta su forma. En otras palabras, dos partículas similares pero de distintas naturalezas tendrán el mismo número pero un índice distinto como por ejemplo T1 y S2. Finalmente el conjunto de ensayos realizados fue el siguiente y se corresponde a cada hilera en la figura 3-15:

SS16-SS20 TS16-TS20

SM11-SM15 TM11-TM15

SS6-SS10 TS6-TS10

SM1-SM5 TM1-TM5

3.4.3. ENSAYOS EDOMÉTRICOS

El programa de ensayos efectuado comprende un total de 12 ensayos edométricos realizados en una célula Rowe de ϕ=150 mm. De estos 12 ensayos, 4 se hicieron con pizarras del río Pancrudo tratadas con DMDCS mientras que, los otros 8, consistieron en ensayos con granulometrías y materiales distintos. Los ensayos correspondientes a las dos muestras con recubrimiento hidrófobo se realizaron siguiendo las mismas trayectorias de tensiones que otras dos muestras de iguales características, pero en su estado natural.

El procedimiento seguido durante el ensayo ha sido el procedimiento clásico para ensayos edométricos. Una vez la muestra se encuentra colocada dentro del anillo y, después de haber procedido a montar y cerrar el equipo, se aplica una carga que va aumentando de forma progresiva. Esta carga es introducida de forma escalonada con una duración de al menos 24 horas en cada escalón para apreciar la cinética del fenómeno de fluencia. Se observa que a carga constante las deformaciones verticales son crecientes en función del tiempo de forma lineal a partir de un cierto punto. Las deformaciones se registran después de este tiempo de referencia y siempre en un mismo instante t = 1440 min. La inundación de la probeta se realizó bajo carga constante y en diferentes etapas del ensayo.

3.4.3.1. Granulometría

Las granulometrías consisten en distribuciones uniformes. El objetivo de utilizar una granulometría uniforme es poder observar con mayor claridad la rotura de las partículas. Para ello se comparará la granulometría inicial (recta vertical entre los dos tamices utilizados) con las granulometrías obtenidas de las muestras después de haber sido ensayadas. Por otro lado, hay que tener presente que el número de contactos en las muestras es menor al de otras granulometrías mejor graduadas. Este hecho implica que las fuerzas serán altas ya que estarán concentradas en un menor número de puntos.

El tamaño de las partículas debe ser significativamente inferior al tamaño de la probeta para poder contemplar su comportamiento como el del conjunto global. Montobbio (2001) comenta que tradicionalmente existe una hipótesis admitida en mecánica de suelos de que debe existir una relación mínima de 5 entre el diámetro de las probetas y el tamaño máximo de las partículas del suelo para que el resultado pueda considerarse representativo de las características del suelo.

Con este criterio en mente, y debido a las dimensiones del edómetro Rowe utilizado (ϕ=150 mm), se decidió utilizar, en un primer instante, una distribución uniforme retenida entre los tamices UNE 10 mm y UNE 15 mm con una altura de probeta de 50 mm. Los resultados obtenidos de este primer programa de ensayos no fueron satisfactorios, ni para las pizarras de Lechago ni para las calizas del Garraf, puesto que no se podía observar la propagación subcrítica de fracturas. Las curvas granulométricas finales muestran que las partículas no se rompen diametralmente, sino que el fenómeno presente es una pequeña erosión o rotura de los puntos de contacto. Una vez abierto el edómetro tras la realización del ensayo, se observó que las roturas correspondían a las esquinas de las partículas.

Una vez visto que los tamaños comprendidos entre 10 mm y 15 mm no servían para el estudio se decidió aumentar el tamaño de las partículas y, como consecuencia, la altura de probeta a 100 mm. Teniendo en cuenta la relación mínima recomendada entre los tamaños de las partículas y del equipo se consideró adecuado ensayar muestras formadas por partículas retenidas entre los tamices UNE 20 mm y UNE 30 mm.

Según un planteamiento estadístico de la mecánica de fractura, cuando mayor es el tamaño de una partícula, mayor será la probabilidad de que presente algún defecto (grietas) y, por lo tanto, que tenga una menor resistencia. Además de esta aproximación, si consideramos que el tamaño del equipo se mantiene constante (edómetro Rowe con ϕ=150 mm), cuando mayores sean las partículas, menor será el número de contactos y como consecuencia, se llevará a unas concentraciones altas de tensiones en dichos puntos.

Otra posible solución para fomentar la propagación subcrítica de fracturas sería utilizar tamaños incluso superiores a 30 mm. En este caso sería recomendable cambiar a su vez el equipo utilizado y ensayar las muestras en el edómetro con ϕ=300 mm. Por motivos de poca disponibilidad de grandes bloques de material y, junto con otras dificultades relacionadas con la disponibilidad del equipo, se subestimó dicha solución.

3.4.3.2. Preparación de las muestras

Tanto las gravas calizas como la pizarra cuarcítica se encontraban disponibles dentro de cubos en el almacén del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas del Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSECCPB. Este material fue clasificado por tamices y pesado para ver las cantidades y los tamaños de que se disponía. En las gravas calizas, el tamaño máximo de las partículas fue de 20 mm. Por el contrario, se dispuso de una mayor cantidad de pizarra de Lechago con unos rangos de tamaños superiores.



Figura 3-18: Proceso de tamizado de las gravas calizas. Tamices utilizados: UNE 15 mm y UNE 10 mm.

Para cada material se separó el material disponible y se dejó en ambiente controlado. Una parte del material para las muestras con diámetros mayores se obtuvo de romper grandes bloques con la ayuda de un martillo.

Por otro lado, la humedad relativa de la sala se mantiene entre 50 y 65% a una temperatura de entre 19 y 22°C. A estas condiciones y, aplicando la ecuación siguiente, se obtiene una succión del orden de 65 MPa.

$$\varphi = -\left(\frac{RT\rho_w}{M_w}\right) Ln(HR) \qquad (31)$$

donde φ (MPa) es la succión, R (8,314 J/mol ºK) la constante de los gases, T (ºK) la temperatura absoluta, M_w (0,018 kg7mol) la masa molecular del agua, ρ_w el peso específico del líquido (kg/m^{2}s^2) y HR(-) la humedad relativa.

Antes de introducir las gravas en el anillo, se procedió a preparar el interior de este. Se recubrió con dos capas de polietileno de 0,15 mm untadas con aceite. Este revestimiento permite reducir la fricción lateral entre las partículas y las paredes del edómetro.

A continuación, se introdujo la muestra (tratada o sin tratar) hasta una altura de 50 mm o 100 mm según la granulometría de estudio y se colocó delicadamente de manera manual. El hecho de no compactar la muestra se consideró oportuno ya que las tensiones de compactación son del mismo orden que las tensiones aplicadas. Con esta decisión impedíamos que las partículas se fracturaran antes de empezar el ensayo y, especialmente, después de haber sido tratadas. De este modo se garantiza

que el recubrimiento aplicado es uniforme en toda la superficie de la partícula. En un segundo tiempo se pensó a compactar ligeramente la muestra con vibración. Para ello se dan golpes con un martillo alrededor del anillo hasta alcanzar la misma altura para todas las muestras. Gracias a este procedimiento se consigue bajar el índice de poros inicial sin dañar ni las partículas ni el recubrimiento hidrófobo.

Una vez introducida la muestra, se monta el edómetro. Seguidamente se coloca el aparato de toma de medidas en la parte superior del vástago y se conecta el conjunto al circuito de aire a presión.

La figura 3-19 muestra las diferentes etapas del proceso de preparación de la muestra en el equipo.



(a)



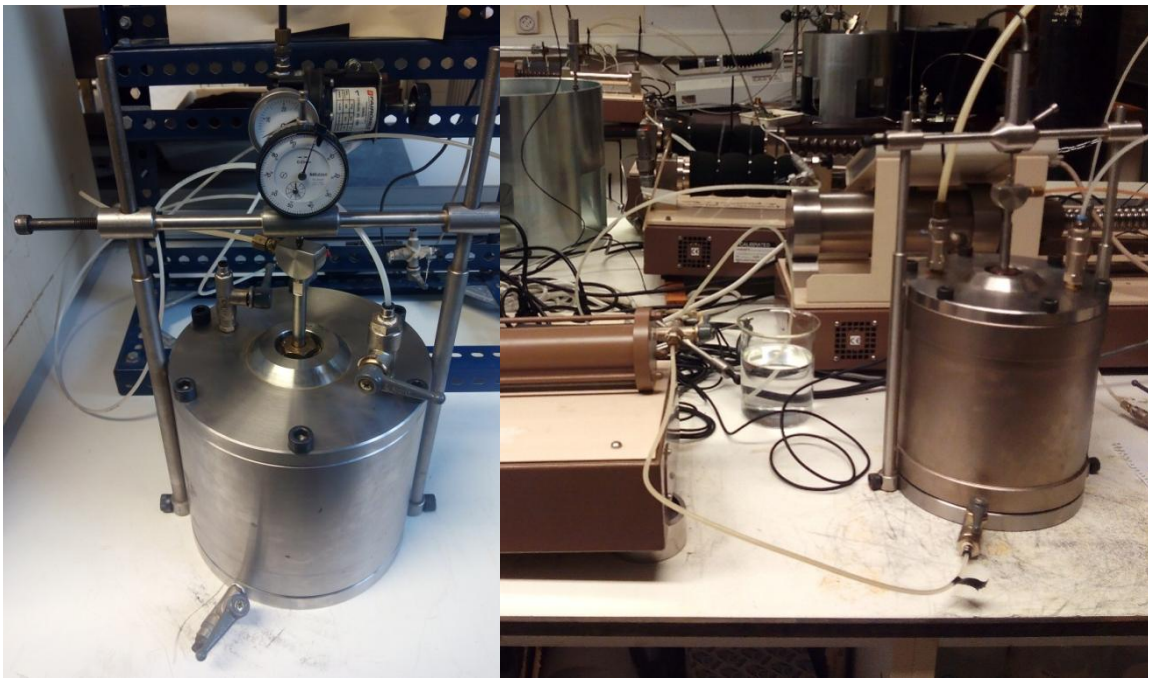
(b)



(c)



(d)



(e) (f)

Figura 3-19 : Preparación de la muestra en el equipo. (a) Vista del área de trabajo con el equipo y la muestra, (b) introducción de la muestra en el edómetro, (c) colocación de la placa que transmite la carga uniforme, (d) colocación de la tapa superior con la membrana, (e) montaje del marco con el aparato de toma de medidas. Equipo con comparador y (f) montaje del marco con el aparato de toma de medidas. Equipo con LVDT.

Una vez finalizado el ensayo, se desmonta el equipo y se toma la altura final de la muestra del mismo modo que se tomó la altura inicial. Por último, se deja secar la muestra y se mide la granulometría final. Los tamices empleados son :

UNE 20 mm - UNE 15 mm – UNE 10 mm– UNE 5 mm – UNE 3,5 mm – UNE 2 mm – UNE 1,2 mm – UNE 0,5 mm

3.4.3.3. Trayectorias tensionales.

Los diferentes ensayos edométricos llevados a cabo se diferencian por el tipo de trayectorias tensionales (secas o saturadas) ya que la tensión aplicada es del mismo orden de magnitud en todos los ensayos. En las trayectorias llamadas secas, la muestra se carga pudiendo saturarse a tensión constante en su etapa final (1,7 MPa o 2,0 MPa), antes de la descarga. Por el contrario, las trayectorias saturadas son aquellas que se inundaron después del primer escalón de carga (20 kPa). Para la saturación de las muestras se emplearon dos técnicas distintas. En un primer instante se recurrió a la metodología más simple. Para ello, se introducía directamente agua líquida en la muestra. Posteriormente, se realizaron dos nuevos ensayos con las mismas características que los ensayos E4PT y E5PT pero, esta vez, se hizo circular vapor de agua (HR = 100%). Estas condiciones de humedad relativa equivalen a una succión de 0 MPa y por lo tanto al mismo estado que en la inundación directa con agua.

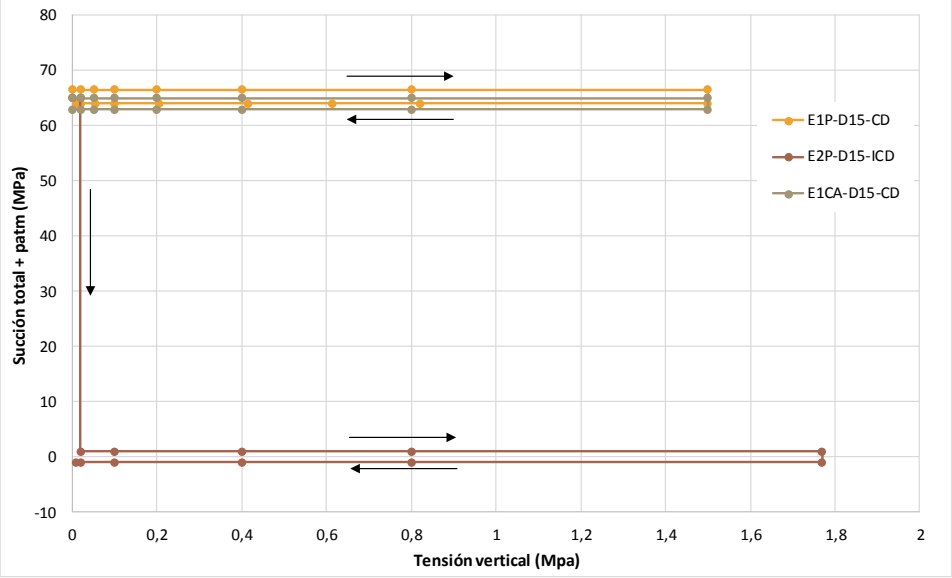
La humedad relativa de las partículas en condiciones ambientes corresponde a la humedad relativa del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas del Departamento

de Ingeniería del Terreno de la UPC. La humedad se mantiene entre 50-65%, a una temperatura de 19-22 ºC lo que corresponde a una succión aproximada de 65 MPa.

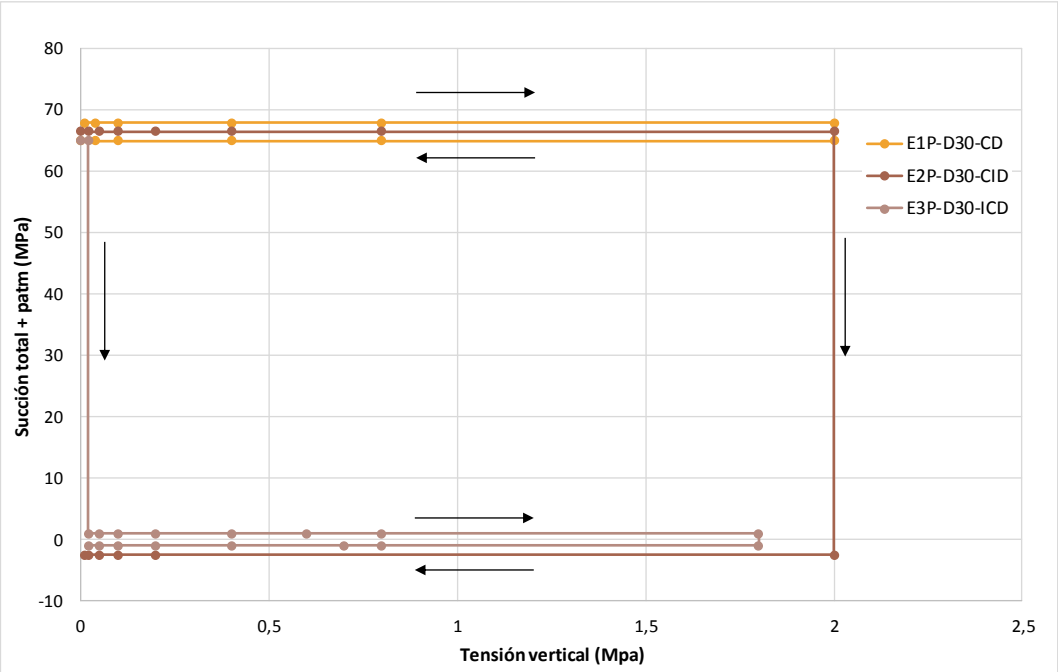
Por una cuestión de simplicidad operativa no sé introdujo un sistema de saturación parcial en el equipo, teniendo como posibilidad succiones de 0 o 65 MPa.

La tensión máxima aplicada se ve limitada por el mínimo de tres factores: la resistencia del edómetro Rowe, la configuración tensión de entrada en el laboratorio durante los ensayos y la resistencia del regulador de presión. El elemento crítico fue la tensión de salida de los dos reguladores de presión disponibles. El aparato instalado en el equipo con medición automática de desplazamientos (LVDT) consigue llegar a una tensión de 2,0 MPa mientras que, el aparato instalado en el edómetro con medición manual de desplazamientos, tan solo es posible alcanzar los 1,7 MPa.

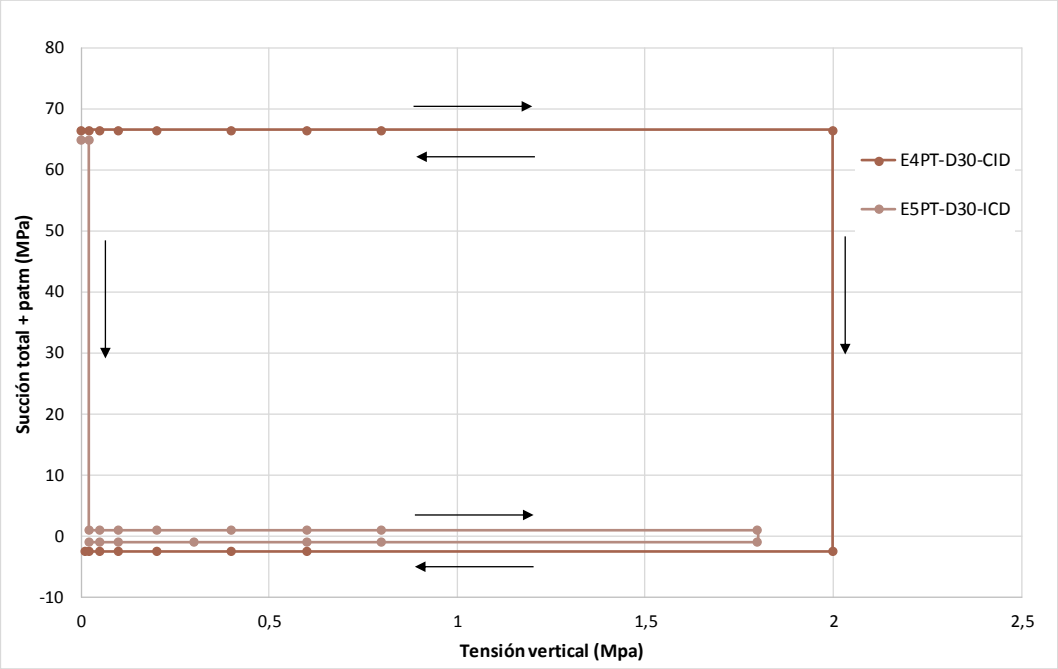
Los escalones de carga se fueron doblando de valor para conseguir una buena representación en escala semilogarítmica. Se tomó un valor inicial bajo e igual a 20 kPa para poder cuantificar el punto en que la membrana entraba en contacto completo con la piedra porosa superior. Cada carga se transmitió durante al menos 24 horas. Los escalones de carga aplicados para todos los ensayos fueron: 20 kPa – 50 kPa – 100 kPa – 200 kPa – 400 kPa – 600 kPa - 800 kPa – 1,8 MPa / 2,0 MPa.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-20: Trayectorias tensionales. (a) ensayos preliminares, (b) ensayos con material de diámetro máximo igual a 30 mm sin tratar con inundación directa y (c) ensayos análogos a (b) con material tratado.

Los 4 ensayos tratados y sin tratar con saturación con vapor de agua se realizaron siguiendo las mismas trayectorias que los ensayos representados en la figura 3-20.

3.4.3.4. Nomenclatura de los ensayos

Los ensayos se fueron numerando junto con la introducción de una nomenclatura en función del material, del tamaño de grano, del tratamiento y de las trayectorias

tensionales. Para cada material y tamaño de grano se inició la numeración. Siguiendo este criterio, E_n indica el número de ensayo; las siguientes letras el material (P: pizarra o CA: caliza); a continuación, si el material ha sido o no tratado (T: tratado); el diámetro máximo (D15: diámetro máximo de 15 mm o D30: diámetro máximo de 30 mm); y finalmente, la trayectoria tensional (C: carga, D: descarga, I: inundación directa con agua y S: saturación con vapor de agua). Los ensayos realizados, en orden cronológico fueron:

Ensayo	Equipo de lectura	Carga máxima (MPa)	Carga de inundación (MPa)	Método de inundación
E1CA-D15-CD	LVDT	1,5	-	-
E1P-D15-CD	Comparador	1,5	-	-
E2P-D15-ICD	Comparador	1,8	0,02	Gotas de agua
E1P-D30-CD	LVDT	2,0	-	-
E2P-D30-CID	LVDT	2,0	2,0	Gotas de agua
E3P-D30-ICD	Comparador	1,8	0,02	Gotas de agua
E4PT-D30-CID	LVDT	2,0	2,0	Gotas de agua
E5PT-D30-ICD	Comparador	1,8	0,02	Gotas de agua
E6PT-D30-CSD	LVDT	2,0	2,0	Vapor de agua
E7PT-D30-SCD	Comparador	1,8	0,02	Vapor de agua
E8P-D30-CSD	LVDT	2,0	2,0	Vapor de agua
E9P-D30-SCD	Comparador	1,8	0,02	Vapor de agua

Tabla 3-4: Ensayos edométricos realizados. Características de sus equipos y carga de inundación.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. ÁNGULO DE CONTACTO

Uno de los principales objetivos del presente estudio es lograr crear un recubrimiento hidrófobo en gravas para su posterior estudio. Como consecuencia, en un primer instante es necesario analizar la mojabilidad de las partículas antes y después de aplicar el tratamiento escogido. Se optó por la utilización directa de DMDCS por su mayor simplicidad y mayor literatura disponible frente a los otros compuestos químicos disponibles. Se descartó la utilización de un agente hidrófobo para hormigones puesto que estos productos se distribuyen ya finalizados en forma de producto comercial. Este hecho conlleva una menor flexibilidad a la hora de escoger la formulación y las concentraciones de agente a utilizar.

El tratamiento consiste en la sumersión de las partículas en la mezcla de DMDCS y agua (una vez producida la reacción química). Las muestras están listas después de quitar el excedente de líquido y dejarlas secar al aire.

Para determinar el grado de mojabilidad del material antes y después del tratamiento se siguió un procedimiento similar al del *Sessile Drop Method* (SDM). Se optó por esta metodología puesto que es la única en el estudio de suelos que se ajusta a granulometrías gruesas. Teniendo en cuenta el tamaño relativo entre las gotas de agua y las partículas, entre 20 y 30 mm, resulta imposible analizar la hidrofobicidad del conjunto. A diferencia de los suelos finos, en el caso particular de las escolleras se ha considerado adecuado estudiar el comportamiento de las partículas frente al agua. Para ello, se calculó directamente el ángulo de contacto estático formado entre la superficie llana de la partícula y una gota de agua. Se usó una cámara fotográfica digital de alta resolución Canon EOS 1100D de 12 megapíxeles con un objetivo macro EFS 18-55mm 0.8ft. La cámara fotográfica se usó junto con un dispositivo de sujeción (trípode) y un dispositivo de fondo blanco. Las partículas seleccionadas para ser fotografiadas, con una superficie especialmente lisa, fueron las mismas antes y después de ser tratadas. Una vez colocadas en el dispositivo se pipeteó una gota de agua en su superficie.



Figura 4-1: Partículas no tratadas en el dispositivo fotográfico.

En el caso de los materiales no tratados, el agua formó una película encima de la superficie sin poder apreciar el ángulo de contacto. Se supuso mojabilidad completa

con un ángulo de contacto igual a 0º. Por el contrario, cuando la gota de agua es pipeteada en una superficie tratada con DMDCS la gota permanece unida.



Figura 4-2: Forma de una gota de agua pipeteada encima de una superficie de pizarra antes de ser tratada.



(a) (b)

Figura 4-3 : Forma de una gota de agua pipeteada encima de una misma superficie de pizarra (a) antes de ser tratada y (b) tras el recubrimiento hidrófobo a base de DMDCS.

Para el análisis de la efectividad del tratamiento y, por lo tanto, del grado de mojabilidad de las partículas, se recurrió a un estudio fotográfico. Se tomaron fotografías de varias partículas con distintos tamaños y procedentes de tratamientos efectuados en distintos días. La concentración en masa de DMDCS por kg de escollera fue mantenida para todos los tratamientos (C = 0,05% equivalente a 4,67 ml kg^{-1}). Tal y como se suponía, los resultados obtenidos son idénticos en todo el material tratado (≈ 9 kg). Por otro lado, se estudió también la influencia de la rugosidad en la mojabilidad. Para ello se clasificaron las superficies de las partículas como rugosas y no rugosas. Una vez realizada la toma de fotografías se calculó el ángulo de contacto aparente de la fotografía. Este proceso se realizó con la ayuda de AutoCAD 2014 debido a la facilidad que presenta para el cálculo de ángulos a partir de la inserción de un archivo JPEG.



Figura 4-4: Medición de los ángulos de contacto con AutoCAD 2014 a partir de las fotografías tomadas.

Se realizaron 69 fotografías correspondientes a 37 superficies lisas y32 superficies rugosas del conjunto de materiales tratados. Para medir los ángulos de contacto en ambos lados de la gota se dibujaron dos rectas auxiliares para cada ángulo. Una recta simulaba la superficie de la pizarra y la otra recta se dibujaba tangente a la gota de agua por el punto de contacto entre ambos materiales. El ángulo de contacto fue medido seguidamente con la herramienta de medida de ángulos entre rectas de AutoCAD 2014. Las fotografías tomadas se clasificaron en tres categorías en función de cuya muestra (M1, M2, M3, M4 y M5) se sacó la partícula. Además, dentro de un mismo grupo de partículas tratadas conjuntamente, se distinguió entre superficies lisas y rugosas (L y R respectivamente). De este modo, los resultados se analizaron por categorías.

Por un lado, se hizo un primer análisis donde se midieron los dos ángulos que forma una gota con la superficie de la partícula, que por su naturaleza está ligeramente inclinada. En otras palabras, se consideró como conjunto de valores la unión de los ángulos de avance y los ángulos de retroceso.

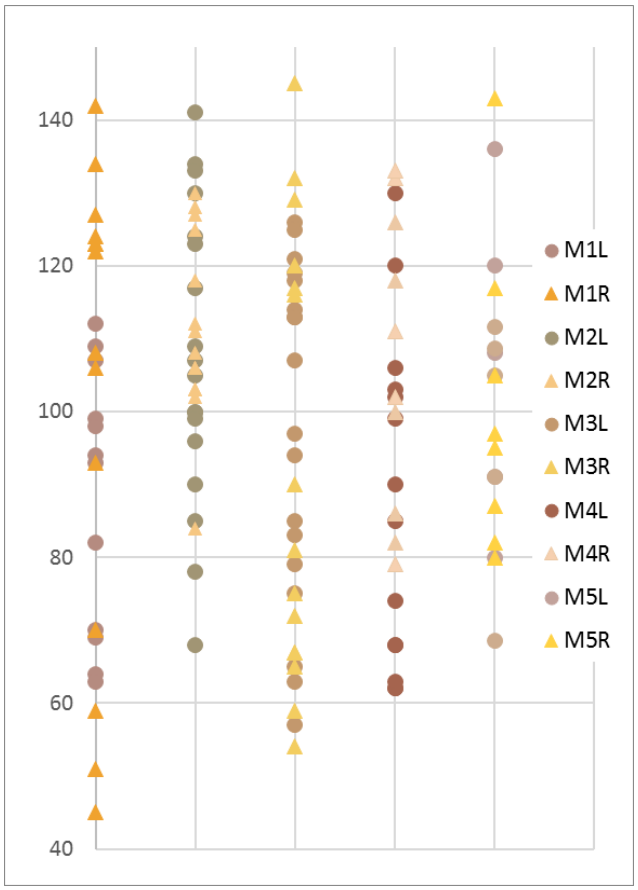


Figura 4-5: Ángulos de contacto medidos en distintas partículas.

El cálculo de la media y la desviación típica permiten observar la dispersión de los datos. Por un lado, destacar que en todas las muestras excepto M3, la rugosidad aparente de las superficies contribuye al aumento del ángulo de contacto tal y como se espera teóricamente. Aun así, la dispersión de los datos es tal que no permite observar grandes diferencias entre las distintas categorías.

Muestra	Media ($\bar{x}$)	Desviación típica (σ)
M1L	88	18
M1R	102	33
M2L	108	21
M2R	112	13
M3L	97	23
M3R	93	31
M4L	88	23
M4R	107	20
M5L	97	21
M5R	101	20

Tabla 4-1 : Media y desviación típica del conjunto de ángulos de contacto medidos para cada conjunto de partículas.

Tras no obtener resultados relevantes se volvió a realizar el mismo análisis. Esta vez se calculó el ángulo de contacto de equilibrio a partir de los ángulos medidos (de

avance y de retroceso) con la aproximación propuesta por Marmur (ver ec. (23)). Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente figura.

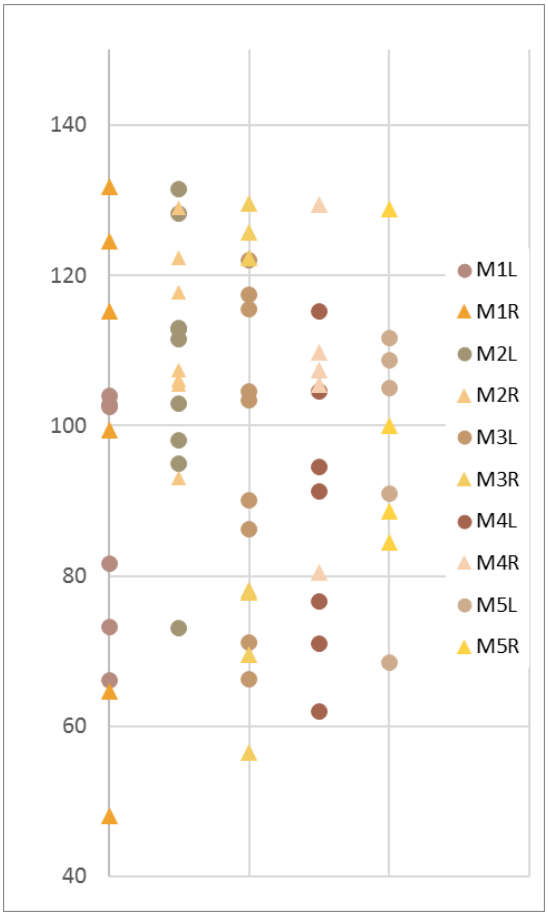


Figura 4-6: Ángulos de contacto de equilibrio calculados con la aproximación de Marmur a partir de los ángulos medidos.

Nuevamente, no se aprecia la contribución teórica en la no mojabilidad de una superficie que debería introducirse con la rugosidad de esta. Por el contrario, es interesante relevar que en todos los casos el ángulo de contacto medio es superior a los 90 º.

4.2. COMPRESIÓN UNIAXIAL DE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO

Dada la gran variabilidad en la forma de las partículas y sabiendo que esta influye significativamente en la compresibilidad de la escollera (Cañavate, 2010) se optó por estudiar 40 partículas con distintas formas.

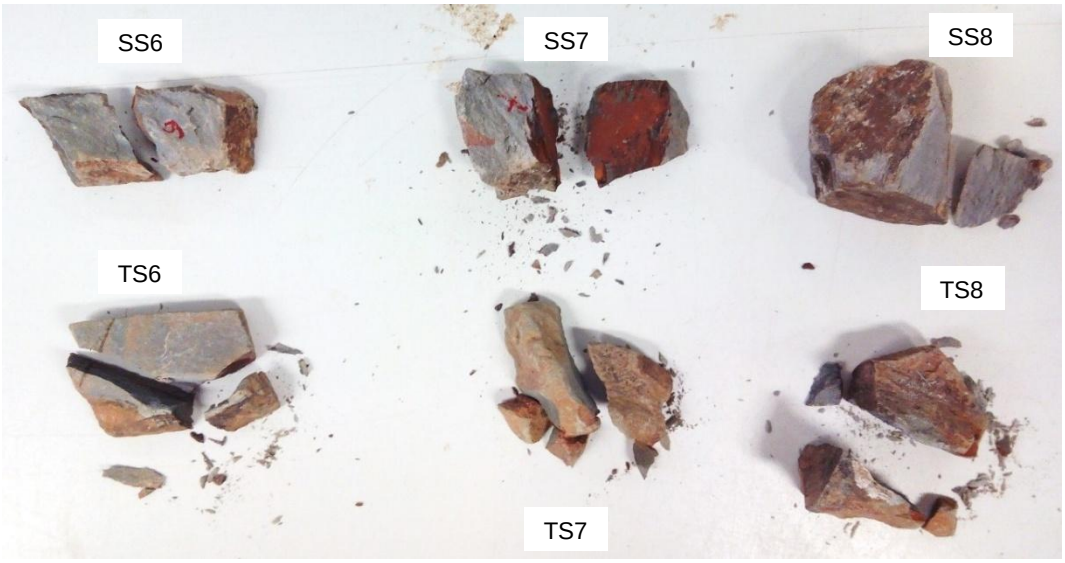


Figura 4-7 : Partículas SS6 – SS8 y TS6 – TS8 tras la rotura durante el ensayo de compresión uniaxial entre dos placas de acero.

Los resultados obtenidos reflejan la gran variabilidad de resistencias a compresión de las partículas principalmente debida a su forma, tamaño y discontinuidades. Referente a la forma, destacar que las partículas con una geometría regular, en forma de paralelepípedo con las caras superiores e inferiores planas (ver figuras en el anejo), parecen tener una mayor resistencia.

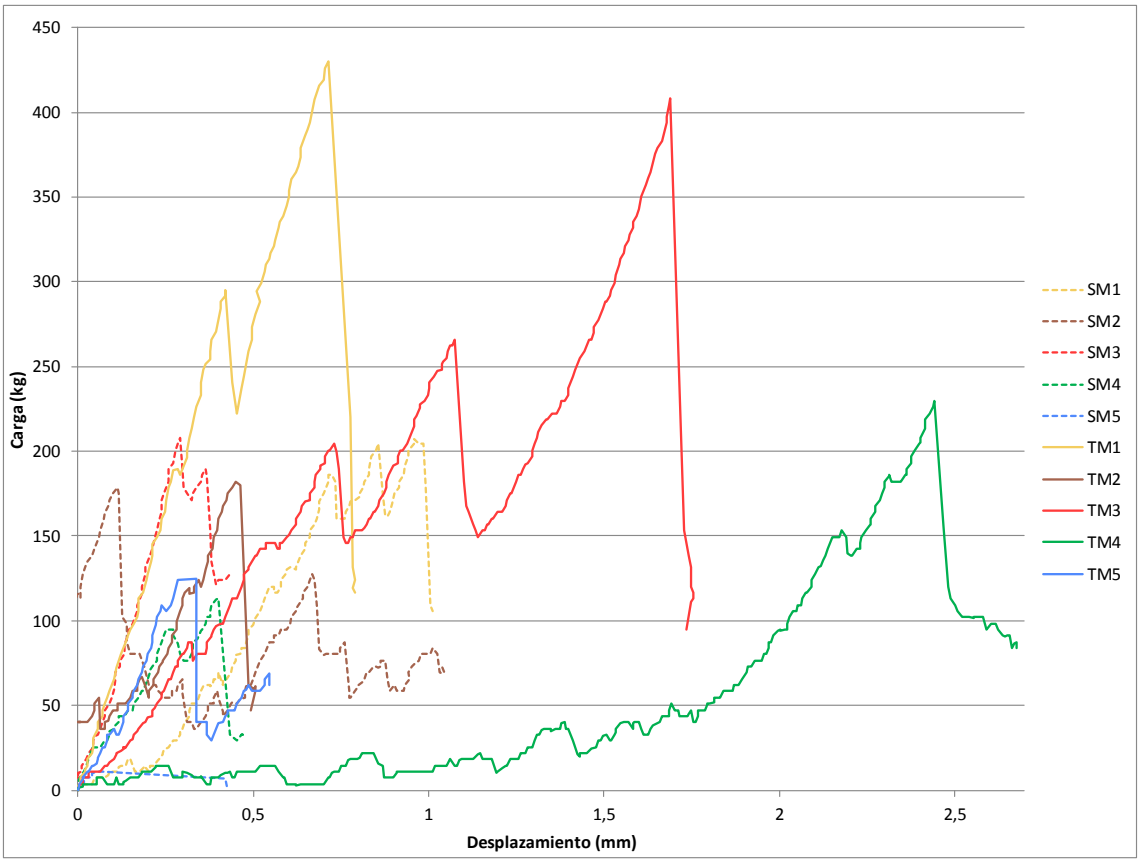


Figura 4-8: Relación desplazamiento – carga de 10 partículas saturadas. En líneas continuas material tratado y en discontinuas material natural.

Analizando ahora la diferencia de comportamiento entre el material con un recubrimiento hidrófobo y el material en su estado natural, ahora sí que se intuye una diferenciación mayor. Para ello se han calculado las tensiones como la carga de rotura dividida por el diámetro al cuadrado.

$$\sigma = \frac{F}{d^2} \qquad (32)$$

Los valores obtenidos a partir de los 40 ensayos realizados se resumen en la tabla siguiente:

Ensayo	Tensión (kg/cm^2)	Ensayo	Tensión (kg/cm^2)	Ensayo	Tensión (kg/cm^2)	Ensayo	Tensión (kg/cm^2)
SM1	52	**TM1**	98	**SS6**	24	**TS6**	47
SM2	55	**TM2**	33	**SS7**	29	**TS7**	32
SM3	66	**TM3**	54	**SS8**	41	**TS8**	71
SM4	58	**TM4**	80	**SS9**	313	**TS9**	262
SM5	5	**TM5**	195	**SS10**	87	**TS10**	616
SM11	17	**TM11**	63	**SS16**	94	**TS16**	26
SM12	35	**TM12**	101	**SS17**	48	**TS17**	206
SM13	61	**TM13**	193	**SS18**	34	**TS18**	12
SM14	85	**TM14**	446	**SS19**	133	**TS19**	106
SM15	111	**TM15**	136	**SS20**	128	**TS20**	81

Tabla 4-2 : Tensiones de rotura clasificadas en 4 categorías según las condiciones de la muestra.

Vemos que, por un lado, en condiciones secas los valores obtenidos están contenidos en un único rango tanto si el material fue tratado o no. Por otro lado, se analizaron las partículas estudiadas bajo condiciones saturadas. Las muestras que no fueron recubiertas con el agente hidrófobo presentan una resistencia inferior y pertenecen a un rango inferior de cargas (desviación típica significativamente menor). Otro fenómeno relevante que se percibe tras los ensayos de compresión uniaxial de una sola partícula es que una vez tratadas, las partículas presentan el mismo comportamiento en condiciones mojadas y secas.

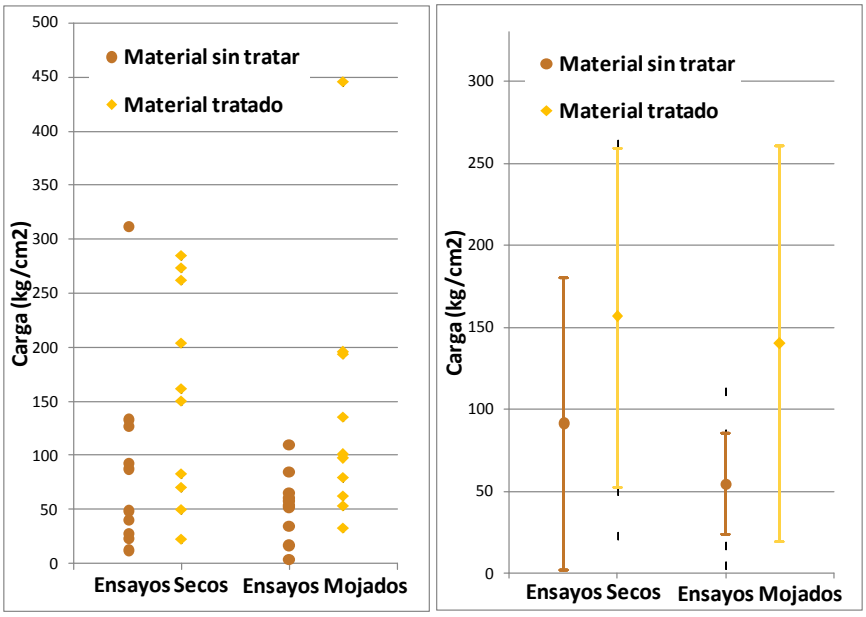


Figura 4-9 : Tensiones en la rotura para las 40 partículas ensayadas (derecha) y medias y desviaciones típicas de cada clase (izquierda).

4.3. ENSAYOS EDOMÉTRICOS

4.3.1. ENSAYOS PRELIMINARES

En un primer instante se realizó un programa de ensayos iniciales. Estos primeros experimentos se realizaron con ambos materiales disponibles y con una granulometría uniforme con tamaños comprendidos entre los tamices 10 – 15 mm (E1P-D15-CD, E2P-D15-ICD y E1CA-D15-CD). La elección de los tamaños viene justificada por la mayor cantidad de material disponible dentro de dicho rango de dimensiones de grano.

Los resultados de deformación vertical obtenidos fueron satisfactorios al ajustarse al orden de magnitud esperado. A partir de las curvas tensión - deformación se puede afirmar que la caliza presenta un comportamiento más rígido que la pizarra. Este hecho está fuertemente relacionado con la naturaleza de ambas rocas. En el caso de las pizarras, la presencia de planos de estratificación presenta puntos de debilidad naturales en los cuales las fisuras se abren más fácilmente.

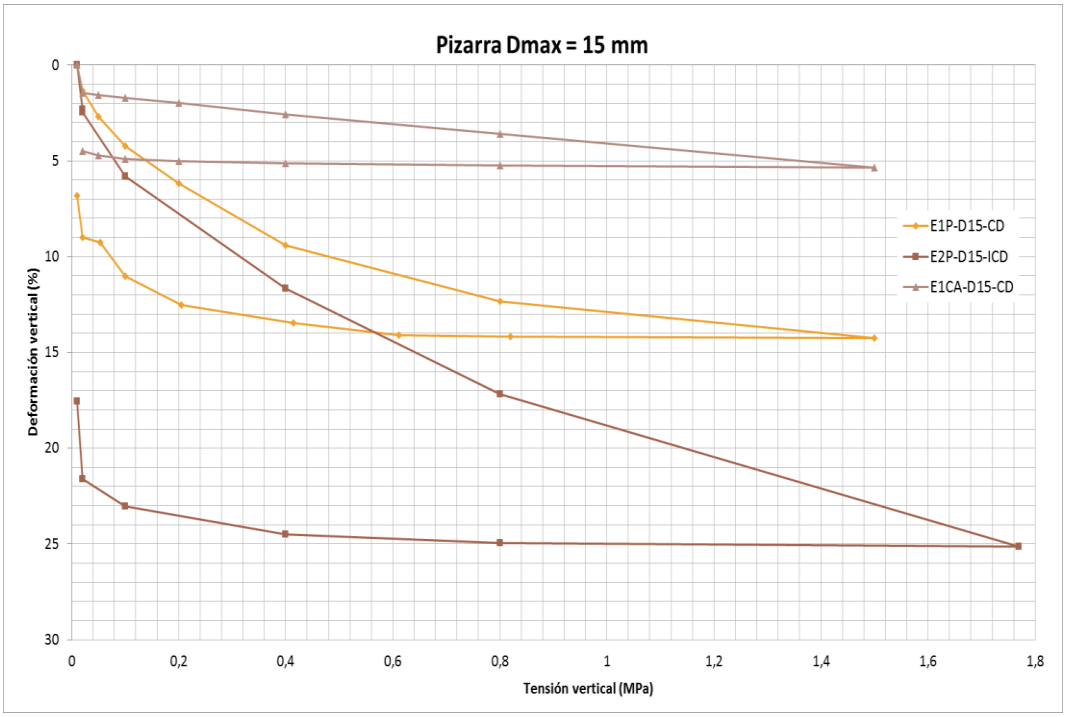


Figura 4-10 : Curvas tensión deformación en escala natural. Ensayos preliminares.

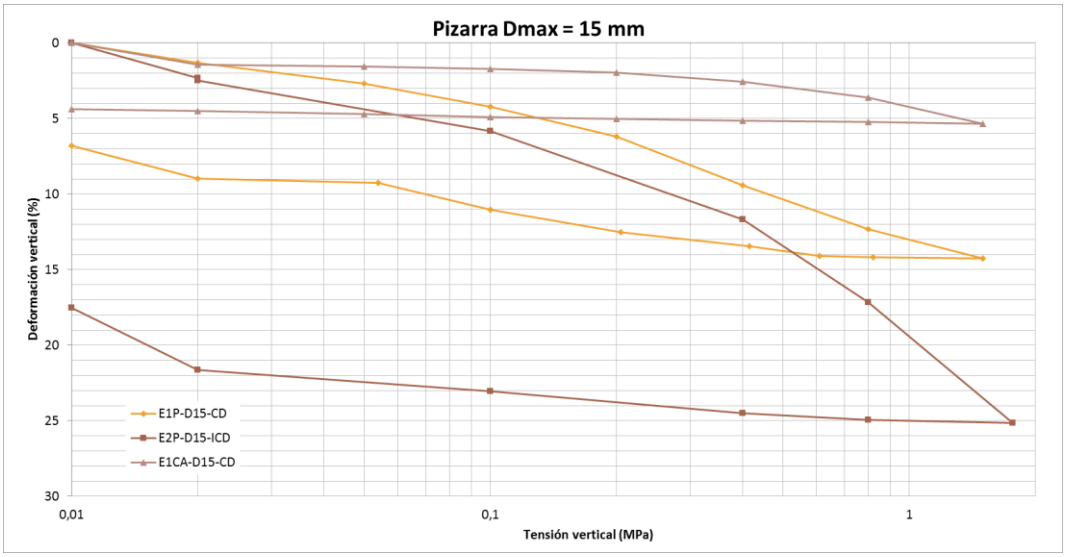


Figura 4-11: Curvas tensión deformación en escala semilogarítmica. Ensayos preliminares.

Por otro lado, después de haber abierto el edómetro tras el ensayo se observó que las partículas se habían roto ligeramente. La rotura que sufrieron fue principalmente el desprendimiento de las esquinas junto con la degradación de los puntos de contacto. A partir de las curvas granulométricas obtenidas tras ensayar la muestra se computan los parámetros de rotura de partículas. Los valores obtenidos se resumen en la tabla 4-2.

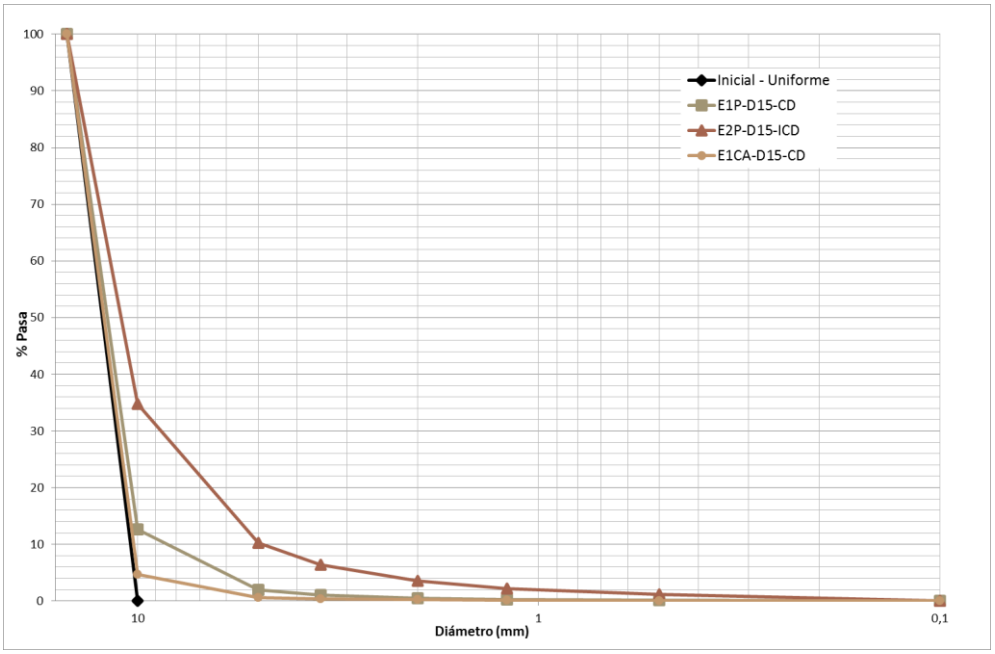


Figura 4-12: Granulometrías inicial y finales de los ensayos preliminares (E1P-D15-CD, E2P-D15-ICD y E1CA-D15-CD).

	Marsal (Bg) (%)	Hardin (Br) (-)
E1P-D15-CD	12,6	0,058
E2P-D15-ICD	34,8	0,179
E1CA-D15-CD	4,6	0,021

Tabla 4-3: Parámetros de rotura de partículas. Ensayos preliminares.

Las roturas observadas no son significativas para el estudio de la propagación de fisuras con lo que se decidió modificar la granulometría para fomentar la apertura diametral de las grietas.



(a) (b)

Figura 4-13 : (a) Material con granulometría inical antes del ensayo y (b) material tras el ensayo E2P-D15-ICD.

Una vez analizados los resultados obtenidos inicialmente, se consideró oportuno modificar las hipótesis iniciales con el objetivo de encontrar una tipología de muestra cuyas características permitiesen inducir una rotura mayor de las partículas. En función de lo observado, se desestimó la utilización de la grava caliza debido a su gran rigidez. Así pues, se optó por aumentar el tamaño de las partículas conservando una granulometría uniforme. Esta modificación de tamaño fuerza un aumento de las fuerzas puntuales aplicadas debido a que hay un menor número de contactos.

4.3.2. ENSAYOS CON GRANULOMETRÍA UNIFORME DE DIÁMETRO MÁXIMO IGUAL A 30 MM. INUNDACIÓN DIRECTA.

Los ensayos preliminares llevados a cabo permitieron ver que no era posible el estudio de la rotura de la estructura con la granulometría escogida inicialmente (Dmax = 15 mm) bajo las tensiones máxima disponibles. En función de estos resultados se decidió aumentar el tamaño de grano de las partículas, conservando a su vez una granulometría uniforme. Debido a la limitación del tamaño del equipo (Edómetro Rowe de 150 mm de diámetro) se consideró oportuno escoger partículas comprendidas entre los tamices UNE 20 y UNE 30 mm. Este rango de tamaños satisface las recomendaciones existentes (Montobbio, 2001) entre el tamaño relativo entre las partículas y el equipo. La modificación del tamaño máximo de las partículas conllevó también el aumento de la altura de la probeta a 100 mm.

Con el material descrito se ensayaron tres muestras correspondiendo a los ensayos E1P-D30-CD, E2P-D30-CID, E3P-D30-ICD, E4P-D30-CID y E5P-D30-ICD. Los ensayos se realizaron simultáneamente con los dos equipos disponibles. La principal diferencia entre ambos radica en el sistema de toma de datos y en la tensión vertical máxima aplicable.

4.3.2.1. Evolución de la granulometría

Inicialmente se llevó a cabo un primer ensayo de carga y descarga para asegurar que las nuevas hipótesis de la granulometría eran adecuadas. Una vez abierto el edómetro, y junto con el análisis de la granulometría final, se observó un cambio significativo con los resultados anteriores. La mayoría de partículas presentaron varias fracturas diametrales y grietas. El aspecto de las grietas permite afirmar la presencia del fenómeno de propagación de fisuras característico de las escolleras.



Figura 4-14 : Estado de la muestra justo después de la apertura del edómetro.

Si se analizan las granulometrías obtenidas después de ensayar las muestras se puede apercibir cuantitativamente el porcentaje de partículas y como es esta rotura en función del momento en que se satura la muestra. Teóricamente, se espera una granulometría similar para dos puntos que estén en la misma superficie de fluencia. De este modo los resultados de los ensayos E2P-D30-CID y ensayo E3P-D30-ICD deberían coincidir. En los ensayos realizados con las muestras con un recubrimiento hidrófobo se observan dos comportamientos distintos en función del momento en que se saturó la muestra. Por un lado, la curva granulométrica de E2P-D30-CID alcanza la misma forma y valores que en los casos donde las partículas no habían sido tratadas. Por el contrario, en el caso del mismo material hidrófobo en el que la inundación tuvo lugar al inicio del ensayo, aquí sí que se observa una prevención de la rotura de las partículas. Este fenómeno se aprecia a su vez en las curvas de tensión – deformación tal y como se verá a continuación.

El comportamiento observado viene asociado al hecho que el tratamiento hidrófobo aplicado consista en una protección superficial. En el momento en que se ha abierto una grieta, el recubrimiento hidrófobo deja de ser continuo. Esto implica que, en la nueva área formada en la grieta,la rotura se desarrollará exactamente igual que en la escollera natural. Aun así, se podría pensar que a escala global, la contribución del agente hidrófobo en superficie es suficiente para evitar parte de la rotura. Cuando la inundación tiene lugar bajo cargas menores, se ha observado que se consigue impedir la rotura en cierto modo ya que las superficies no resistentes van apareciendo progresivamente. Si la muestra ha sufrido severas deformaciones antes del contacto con el agua, como se da en los ensayos Carga- Inundación-Descarga (CID), hay que tener en cuenta que su granulometría ya ha sido modificada antes de la saturación. Hay que añadir que la muestra se encuentra en una región de endurecimiento clástico. Las partículas que sufren la rotura son aquellas partículas de diámetro inferior que, a

su vez, provienen de la rotura de las partículas iniciales. En otras palabras, las estructuras que se rompen son aquellas quienes ya no disponen de características hidrófobas puesto que son el resultado de la deformación experimentada a lo largo de la carga.

Independientemente, la contribución del agua en la deformación de la estructura corresponde a la diferencia entre el ensayo en seco y los ensayos con saturación de la muestra.

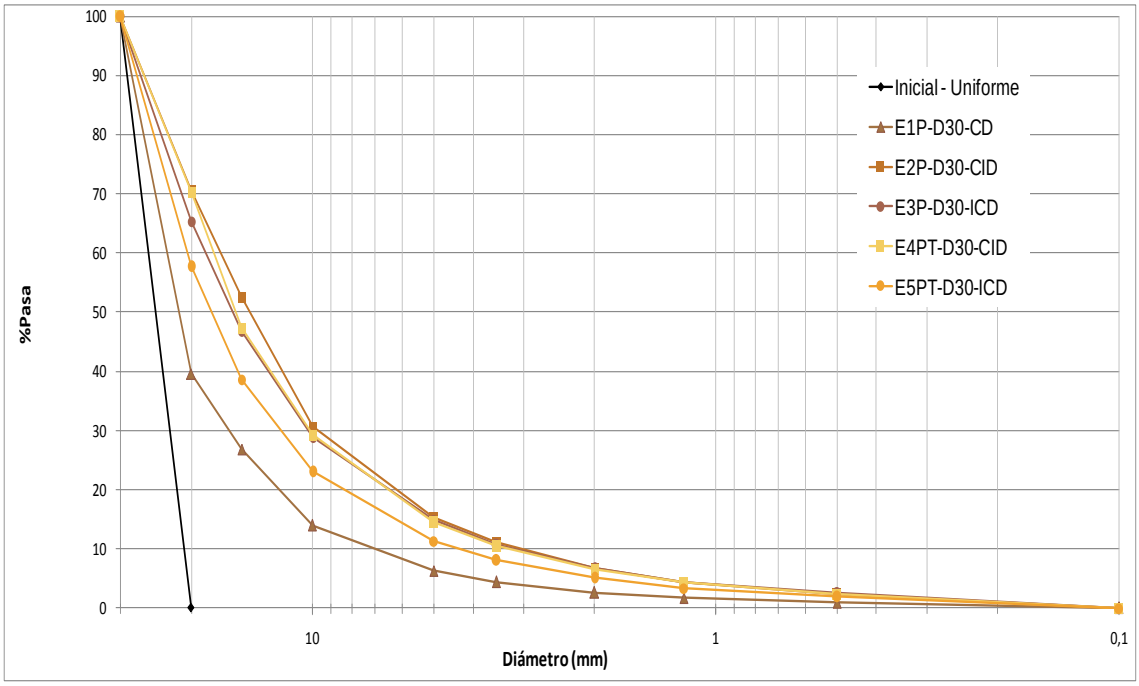


Figura 4-15: Granulometrías inicial y finales de las muestras. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con inundación directa de la muestra.

Las granulometrías inicial y finales permiten computar los parámetros de rotura; el parámetro de rotura de Marsal (Bg) y el parámetro de rotura de Hardin (Br). Para cuantificar la rotura correspondiente a la contribución del agua por colapso se procedió a recalcular ambos índices, pero, en este caso, considerando la granulometría final del E1P-D30-CD como la curva granulométrica inicial. Estos valores se nombraron Bg' y Br' respectivamente. Los valores obtenidos se resumen en la tabla siguiente:

Ensayo	Marsal (Bg) (%)	Hardin (Br) (-)	Marsal (Bg') (%)	Hardin (Br') (-)
E1P-D30-CD	39,7	0,214	-	-
E2P-D30-CID	70,5	0,412	30,8	0,251
E3P-D30-ICD	65,4	0,380	25,7	0,211
E4PT-D30-CID	70,4	0,396	30,7	0,232
E5PT-D30-ICD	57,7	0,322	18,1	0,136

Tabla 4-4: Parámetros de rotura de partículas. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con inundación directa de la muestra.

Las fotos tomadas a lo largo de las etapas de un mismo ensayo permiten ver esta rotura de manera cualitativa. En las figuras siguientes se apercibe la diferencia entre el tamaño inicial y final de la muestra. También se apercibe que la granulometría final de

la muestra está bien graduada puesto que se encuentran todos los tamaños con una cantidad considerable de finos.



Figura 4-16: (a) Material tras el ensayo E3P-D30-ICDy (b) material con granulometría inicial.

Haciendo un cambio de escala en las curvas granulométricas podemos calcular la dimensión fractal final de las muestras. Para ello se cambia de variable en el eje vertical, introduciendo ahora el porcentaje de partículas mayores a un tamaño L en escala logarítmica mientras que, el eje horizontal, no ha sido modificado. Entonces la dimensión fractal (D) corresponde al pendiente de las curvas granulométricas.

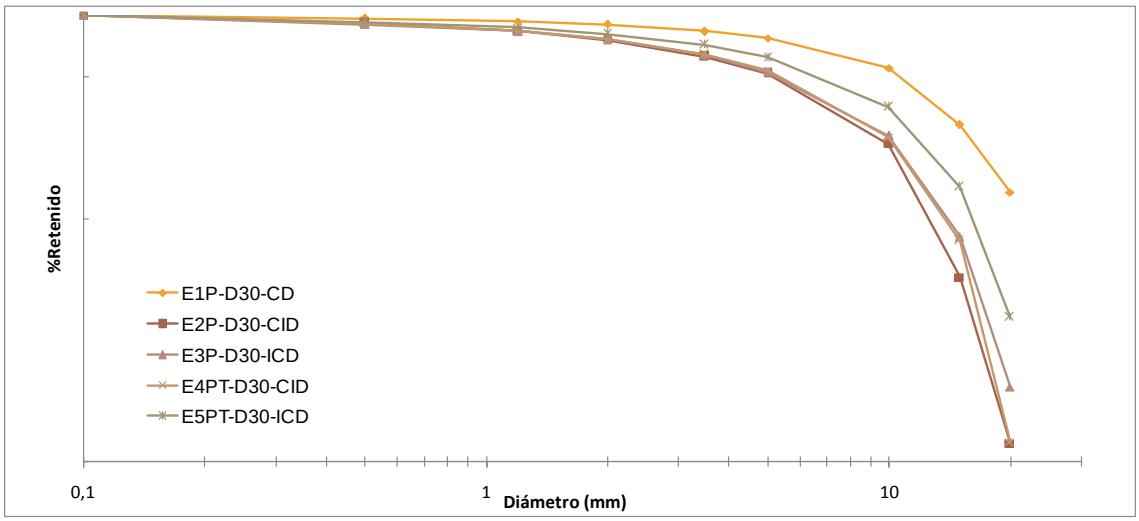


Figura 4-17: Curvas granulométricas en escala logarítmica.

Los valores obtenidos muestran una evolución considerable entre la muestra que se ensayó en seco (E1P) y las muestras que fueron saturadas en algún momento del

ensayo. Aun así, los valores obtenidos parecen estar lejos del máximo teórico con valor 2,5.

Ensayo	Dimensión fractal (D)
E1P-D30-CD	0,503
E2P-D30-CID	1,21
E3P-D30-ICD	1,02
E4PT-D30-CID	1,22
E5PT-D30-ICD	0,84

Tabla 4-5: Dimensión fractal de las muestras tras los ensayos.

De los valores calculados tanto para los parámetros de rotura como para la dimensión fractal se concluye que la influencia del recubrimiento hidrófobo ha sido distinta en función de las trayectorias tensionales. Si se inunda la muestra en un primer instante (trayectorias Inundación-Carga-Descarga), se obtiene una menor rotura apreciable en la granulometría final. Por el contrario, comparando los ensayos con material tratado y sin tratar con trayectorias del tipo Carga-Inundación-Descarga, los resultados de la muestra tratada coinciden con los de las muestras naturales.

Otra apreciación destacada durante el examen de las partículas es la posición de las fracturas. Las grietas se concentran en las zonas de contacto. En las fotografías tomadas al abrir la tapa del edómetro se observa con detalle el estado del proceso de propagación subcrítica de fractura. En función de la partícula, las grietas están más o menos abiertas hasta en algunos casos, presentar una rotura total de la partícula.



(a)



(b)

Figura 4-18: Fotografías de las partículas superficiales de la muestra correspondiente al E2P-D30-CID una vez introducidas al edómetro. (a) Antes del ensayo y (b) después del ensayo.

4.3.2.2. Curvas tensión - deformación

Si analizamos las curvas de tensión – deformación se pueden apreciar las distintas etapas de compresibilidad de la escollera. Inicialmente, bajo la plastificación clástica, la escollera se rompe siguiendo una línea de consolidación normal recta en escala natural. A mayores tensiones, la rotura de las partículas tiene lugar en aquellas de menor tamaño. Este segundo estado corresponde al endurecimiento clástico y se observa con una linealidad entre la tensión en escala logarítmica y la deformación. La tensión que separa ambos fenómenos se define como el parámetro de endurecimiento σ_0^{ch}. Su valor depende de la trayectoria de cada ensayo, pero se corresponde a un valor de deformación fijo. Para las pizarras de Lechago Oldecop y Alonso (2013) obtuvieron valores del 8%. En los ensayos realizados, el inicio del endurecimiento clástico, que se observa con la desviación de las líneas de compresión normal, aparece en un rango de valores del mismo orden de magnitud. Finalmente se tomó un valor de las deformaciones igual a 14%. Si se observan las curvas de la figura 4-19 es en este punto de la deformación vertical que las líneas de compresión normal empiezan a desviarse de la recta. Además, si se dibuja el mismo gráfico en escala semilogarítmica (figura 4-20), se observa en este mismo punto el cambio de comportamiento alcanzando ahora un comportamiento lineal.

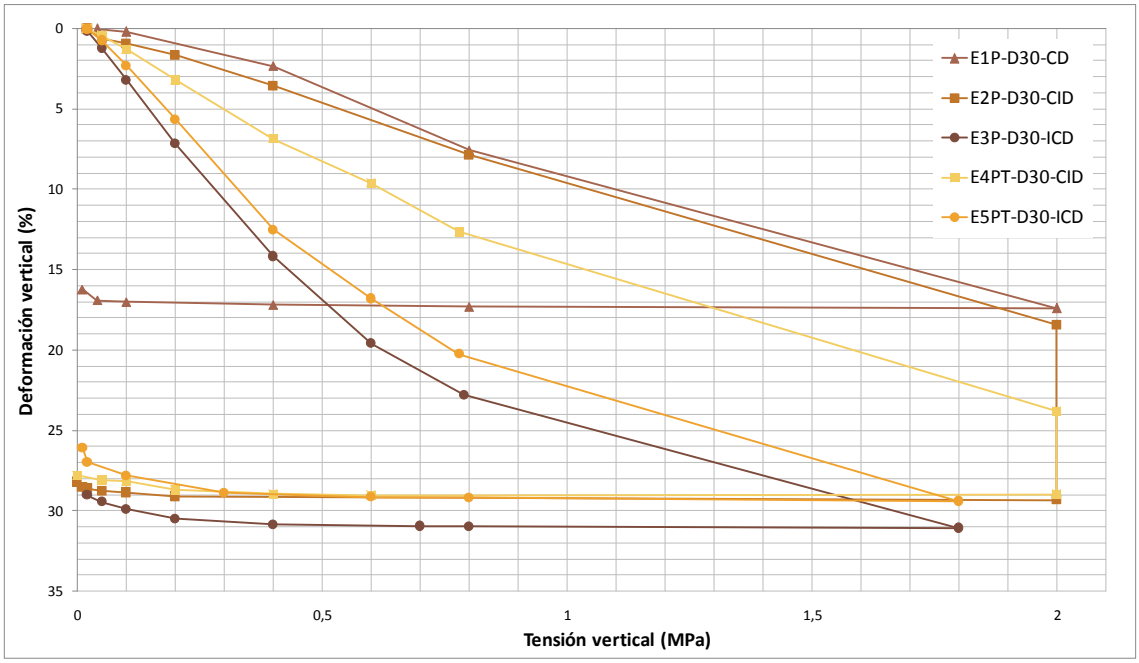


Figura 4-19: Curvas tensión deformación en escala natural. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm e inundación directa.

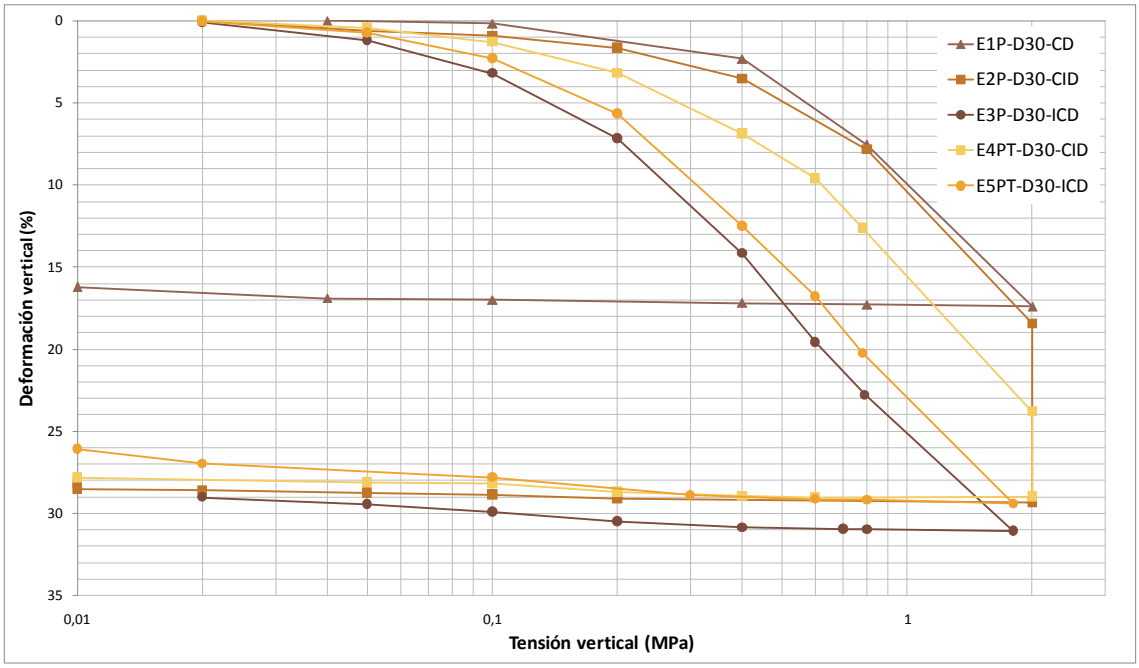


Figura 4-20: Curvas tensión-deformación en escala semilogarítmica. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm e inundación directa.

Por otro lado, se computaron los parámetros del modelo constitutivo para así comparar el comportamiento teórico con el comportamiento observado. Los parámetros asociados a los 5 ensayos realizados con inundación directa se resumen en la tabla siguiente:

Parámetro	E1P-D30-CD	E2P-D30-CID	E3P-D30-ICD	E4PT-D30-CID	E5PT-D30-ICD	Oldecop (2001)	Oldecop (2003)
λ_r (MPa^{-1})	-	-	-	-	-	-	2,200
λ^i(10^{-2}MPa^{-1})	10,01	9,814	-	16,71	-	2,310	1,605
λ_0^d(10^{-2}MPa^{-1})	-	-	27,23	-	16,51	5,108	6,305
λ(10^{-2}MPa^{-1})	10,72	11,57	11,05	11,82	11,30	-	-
σ_y (MPa)	-	-	-	-	-	0,29	0,2
κ (10^{-2}MPa^{-1})	0,226	0,161	0,395	0,442	0,303	0,257	0,092
χ_φ(10^{-2}MPa^{-1})	-	1,68	-	0,795	-	0,2047	0,599
α_φ(10^{-2}MPa^{-1})	-	-	4,216	-	2,556	0,786	0,599
κ_φ(10^{-2}MPa^{-1})	-	-	-	-	-	0,042	0,033
$\varepsilon_{colapso}$ (%)	-	10,89	-	5,171	-	1,4	7,5

Tabla 4-6 : Parámetros del modelo constitutivo determinados a partir de los resultados experimentales.

Diferenciando los ensayos con material hidrófobo de los ensayos con material natural podemos calcular el valor medio de los parámetros del modelo para cada categoría de material. Este valor medio es el que se utilizará más adelante para comparar los resultados experimentales con los resultados teóricos esperados. Merece la pena destacar el hecho que, una vez alcanzado el endurecimiento clástico, las muestras tienen un mismo comportamiento asociado a un mismo valor del índice de compresibilidad.

Por otro lado, comparando el comportamiento entre el material hidrófobo y el material natural parece no percibirse una gran mejora frente a la influencia del agua. Si analizamos los valores computados observamos que los índices relevantes en la compresibilidad de la escollera, tales como los índices de compresibilidadλ^i, λ_0^d y λ, no se ven mejorados substancialmente. Es más, en el caso de la rama seca del ensayo E4PT, la deformabilidad observada es significativamente mayor a los ensayos equivalentes con material no tratado. Se piensa que este hecho puede ser causado por haber usado materiales procedentes de distintos sacos o bien por la diferencia en la forma de las partículas. Otra observación interesante es la reducción de la deformación por colapso del 10,9% al 5,17% con la aplicación del recubrimiento hidrófobo. Estos valores numéricos deberían ser contrastados con repetidos ensayos para analizar su dispersión.

Fue con dicho propósito que se realizaron nuevos ensayos puesto que es difícil sacar conclusiones con las curvas disponibles. Viendo la curva alcanzada en E4PT-D30-CID y sobretodo, el punto correspondiente a la inundación, no se es capaz de averiguar si el hecho que coincida con el punto final del ensayo E2P-D30-CID es una coincidencia. Se podría llegar pensar que ambos puntos pertenecen a una misma superficie de fluencia y que por lo tanto el tratamiento no ha sido efectivo. Otra posible hipótesis conlleva afirmar que el material empleado en E4PT tiene unas características distintas a las de los materiales utilizados anteriormente. En este caso, se trataría de un modelo distinto, cuya superficie de fluencia en estado natural no tendría por qué coincidir con la anterior. De ser así, la deformación por colapso se considera que se habría visto reducida.

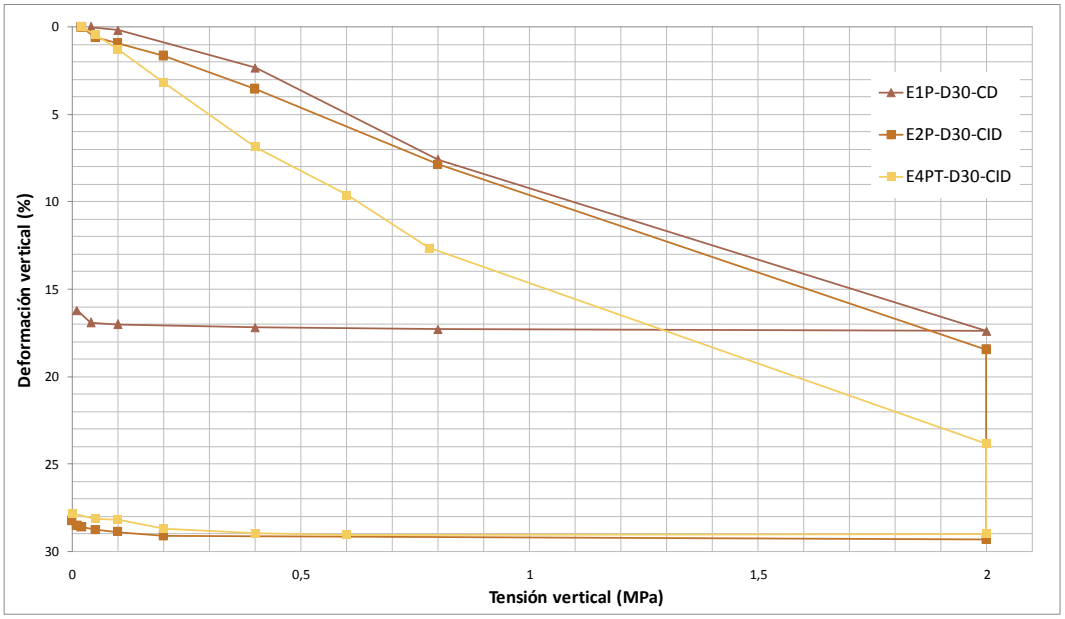


Figura 4-21: Curvas tensión-deformación en escala naturalde las trayectorias con Carga-Inundación-Descarga. Ensayos E1P-D30-CD, E2P-D30-CID y E4PT-D30-CID.

Para las trayectorias ICD, el índice de compresibilidad clástica máximo λ_0^d se ve reducido con el recubrimiento hidrófobo. Esto conlleva una reducción de la deformación vertical del 2,4%.

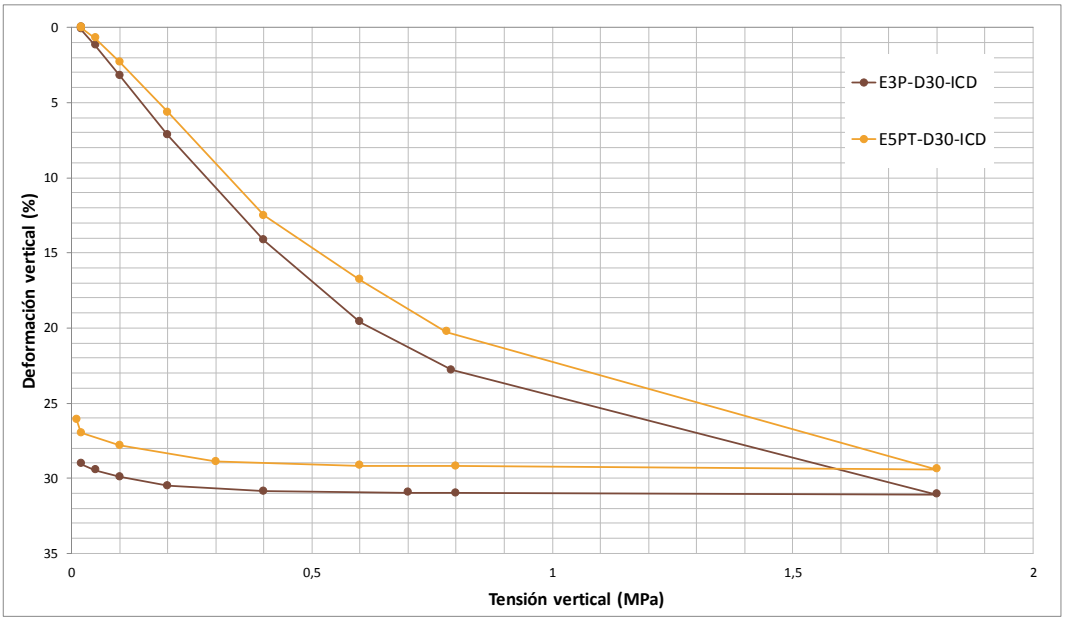
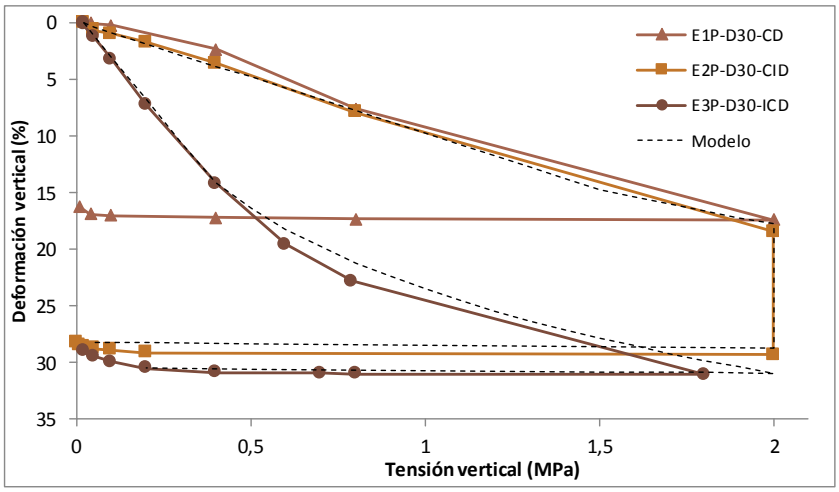
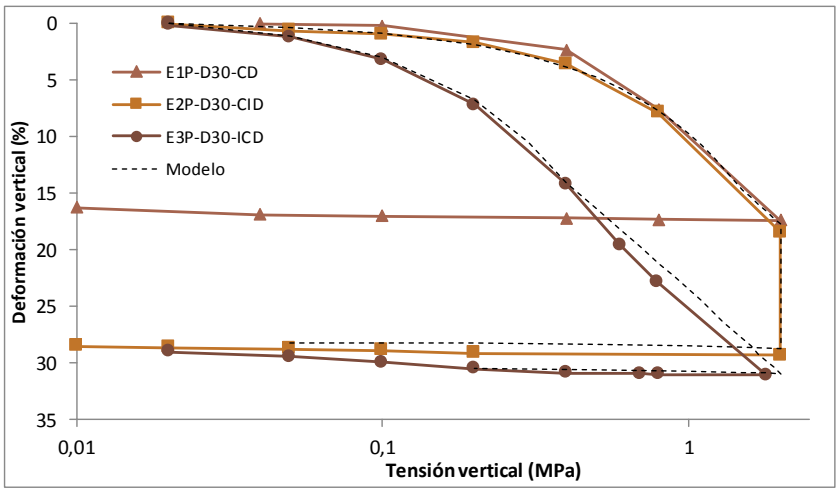


Figura 4-22: Curvas tensión-deformación en escala natural de las trayectorias con Inundación-Carga-Descarga. Ensayos E3P-D30-ICD y E5PT-D30-ICD.

Aplicando la formulación descrita anteriormente con los parámetros calculados podemos comparar la curva teórica con la obtenida en los ensayos edométricos realizados. En las figuras siguientes se muestran dichos resultados, por un lado, con los parámetros correspondientes a la pizarra natural y seguidamente con los parámetros computados a partir de los ensayos con la pizarra tratada.

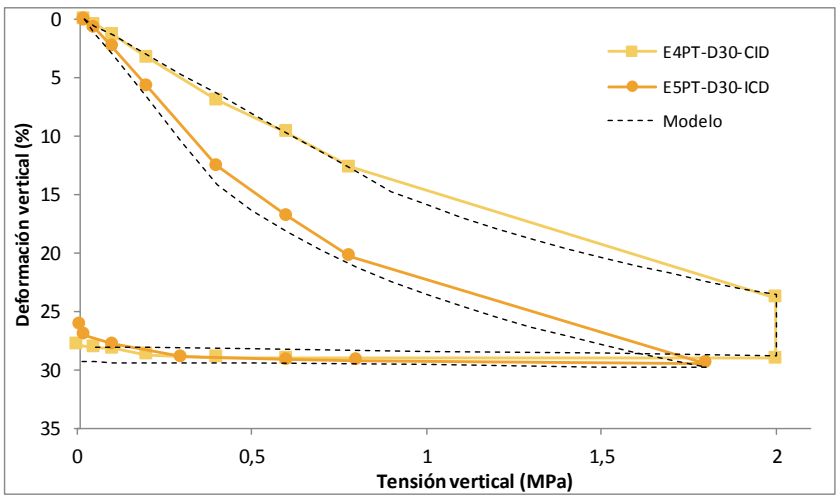


(a)

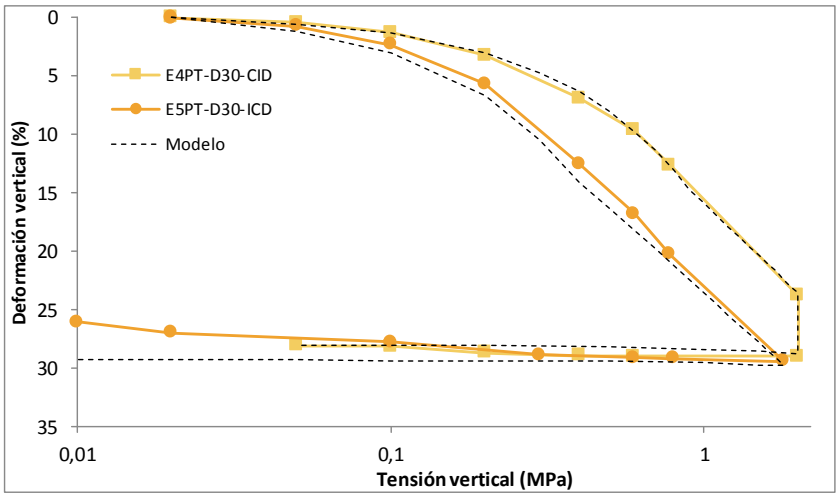


(b)

Figura 4-23: Comparativa entre los resultados experimentales con material natural y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica.



(a)



(b)

Figura 4-24: Comparativa entre los resultados experimentales con material con recubrimiento hidrófobo y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica.

Análogamente, tomando las ecuaciones propuestas por Oldecop y Alonso (2003) junto con los parámetros calculados a partir de los resultados experimentales se obtienen las superficies de fluencia. Cada superficie va asociada a una deformación vertical. Considerando este factor, el valor límite del parámetro de endurecimiento entre la plastificación clástica y el endurecimiento clástico (σ_0^{ch}) se determina encontrando la tensión asociada a una deformación del 14% para el estado “muy seco”.

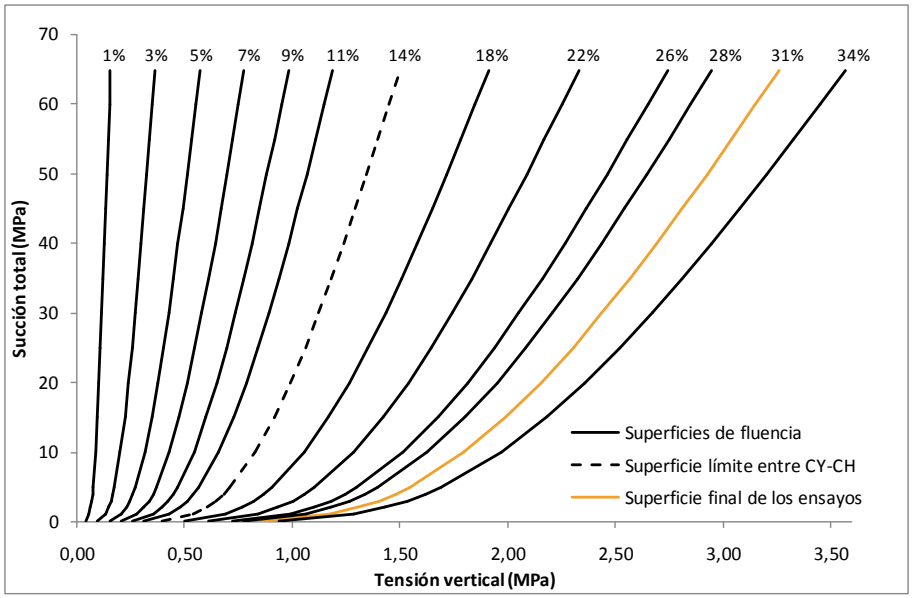


Figura 4-25: Superficies de fluencia para material no tratado con inundación directa.

El comportamiento observado se ajusta al comportamiento esperado. Hasta este punto del programa de ensayos, los resultados son comparables a los de los diversos autores que han trabajado con pizarras del río Pancrudo entre los cuales destacan Oldecop y Alonso, Ramon, Hueso y Cañavate.

4.3.3. ENSAYOS CON GRANULOMETRÍA UNIFORME DE DIÁMETRO MÁXIMO IGUAL A 30 MM. SATURACIÓN CON VAPOR DE AGUA.

Los resultados anteriores no fueron del todo satisfactorios puesto que con un solo tipo de ensayo es complicado interpretar los fenómenos adicionales que interfieren durante la rotura de la pizarra hidrófoba. Entre otros aspectos se esperaba que en condiciones secas la compresibilidad de la escollera natural fuese similar a la de la escollera hidrófoba puesto que el tratamiento consiste en un recubrimiento superficial micrométrico. De este modo, en principio no se espera que influya en la compresibilidad de la muestra si no se introduce el agua en el modelo.

Tampoco se sabía con exactitud la estabilidad del recubrimiento hidrófobo frente al agua de forma que se decidió ampliar el programa de ensayos. Esta vez, con el fin de estudiar la influencia del agua al entrar en contacto con la película hidrófoba, se modificó el sistema de saturación de la muestra. Se planteó la posibilidad de circular agua con DMDCS para que las partículas fueran tratadas al mismo tiempo que se rompían. Esta hipótesis fue descartada ya para que el recubrimiento hidrófobo se adhiera a la superficie tiene que haberse secado. Como alternativa se hizo circular vapor de agua con la ayuda de una bomba. Teóricamente, un ambiente con humedad relativa del 100% es equivalente a una succión de 0 MPa según la ecuación 4.

Se realizaron 4 ensayos adicionales correspondientes a E6PT-D30-CSD, E7PT-D30-SCD, E8P-D30-CSD y E9P-D30-SCD. Dichos ensayos consisten en los ensayos mínimos requeridos para poder computar el modelo constitutivo. El material utilizado fue el mismo que en los 5 ensayos anteriores mientras que el material tratado se obtuvo de las muestras M_4 y M_5.

4.3.3.1. Evolución de la granulometría

Una vez abierto el edómetro y después de la elaboración de las curvas granulométricas finales se procedió al cálculo de los diferentes parámetros de rotura y de la dimensión fractal.

Observando el estado de las partículas tras el ensayo ya se intuye que la rotura es menor con la saturación con vapor de agua.



(a)



(b)

Figura 4-26: Fotografías de las partículas superficiales de la muestra correspondiente al E7PT-D30-SCD una vez introducidas al edómetro. (a) Antes del ensayo y (b) después del ensayo.

Las curvas granulométricas obtenidas muestran que las deformaciones sufridas han sido menores que en los 5 ensayos realizados anteriormente. Este hecho implica unas

granulometrías finales más similares. Los ensayos E7PT y E9P con trayectorias tensionales del tipo Saturación-Carga-Descarga coinciden en sus granulometrías finales, hecho que indica que la eficiencia del tratamiento es menor que anteriormente.

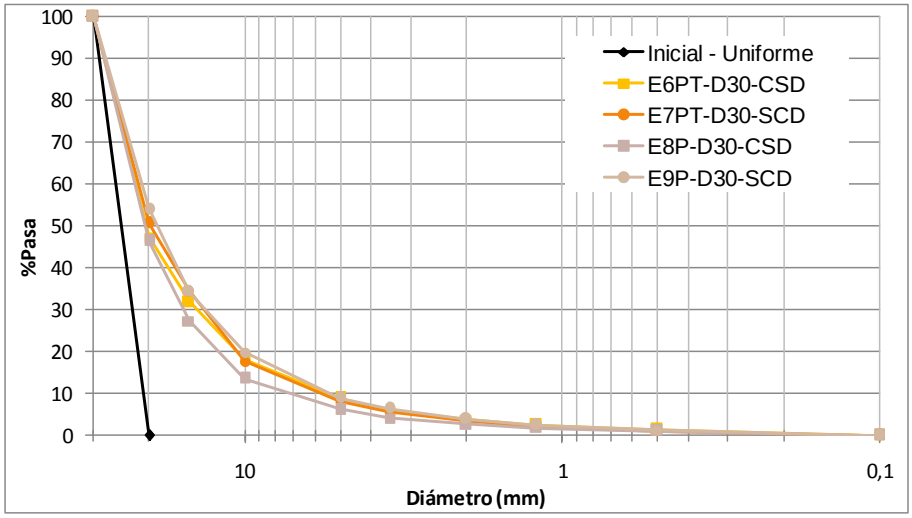


Figura 4-27: Granulometrías inicial y finales de las muestras. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con saturación con vapor de agua.

Las granulometrías inicial y finales permiten computar los parámetros de rotura; el parámetro de rotura de Marsal (Bg) y el parámetro de rotura de Hardin (Br). Al no realizarse un ensayo de Carga-Descarga no se pudo cuantificar la contribución del agua. Los valores obtenidos se resumen en la tabla siguiente:

Ensayo	Marsal (Bg) (%)	Hardin (Br) (-)
E6PT-D30-CSD	47,3	0,261
E7PT-D30-SCD	50,7	0,273
E8P-D30-CSD	46,4	0,234
E9P-D30-SCD	54,0	0,290

Tabla 4-7 : Parámetros de rotura de partículas. Ensayos con material de diámetro máximo igual a Dmax = 30 mm con saturación con vapor de agua.

Modificando la escala vertical de las granulometrías a escala logarítmica y mostrando el porcentaje retenido se obtiene la dimensión fractal del estado final de las muestras.

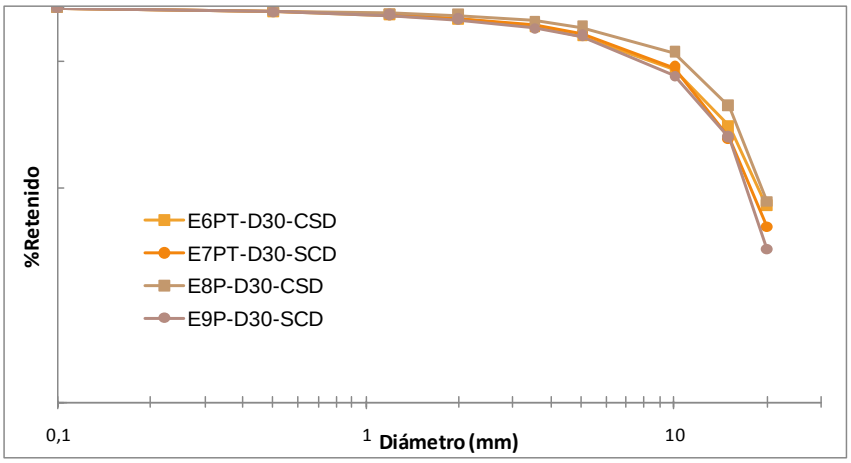


Figura 4-28 : Curvas granulométricas en escala logarítmica.

Ensayo	Dimensión fractal (D)
E6PT-D30-CSD	0,622
E7PT-D30-SCD	0,726
E8P-D30-CSD	0,672
E9P-D30-SCD	0,783

Tabla 4-8 : Dimensión fractal de las muestras tras los ensayos.

Nuevamente, los resultados obtenidos son menores a las trayectorias análogas con inundación directa. Las deformaciones observadas son pequeñas y corresponden a un estado menor de fractura de las partículas. Los valores de las dimensiones fractales indican que la rotura se puede aun desarrollar hasta alcanzar la matriz fractal.

4.3.3.2. Curvas tensión – deformación

En los ensayos con saturación con vapor de agua el procedimiento seguido fue el mismo. Es decir, para cada carga se toman los valores de deformación registrados 24 horas después del inicio. Un primer factor relevante al observar los resultados obtenidos es el hecho que las curvas en condiciones saturadas no se corresponden con las obtenidas anteriormente. Teóricamente, bajo una misma succión, la deformación experimentada es la misma independientemente del medio de saturación. Así lo demostraron experimentalmente Oldecop y Alonso (2003). En el segundo programa de ensayos las deformaciones alcanzadas son menores. Esta discordancia parece poderse explicar con la velocidad de saturación que es menor con vapor de agua frente al agua líquida. Durante el desarrollo de la saturación de una muestra, el colapso se percibía unos segundos después de la introducción del agua mientras que con el vapor de agua era necesario esperar incluso 30 minutos. Otro aspecto que no parece resolverse con claridad es la interacción entre el vapor de agua y el recubrimiento hidrófobo. La menor diferencia entre las curvas saturadas (pizarra tratada y sin tratar) parecen indicar que vapor puede penetrar los macro y micro poros aun disponiendo de un recubrimiento hidrófobo.

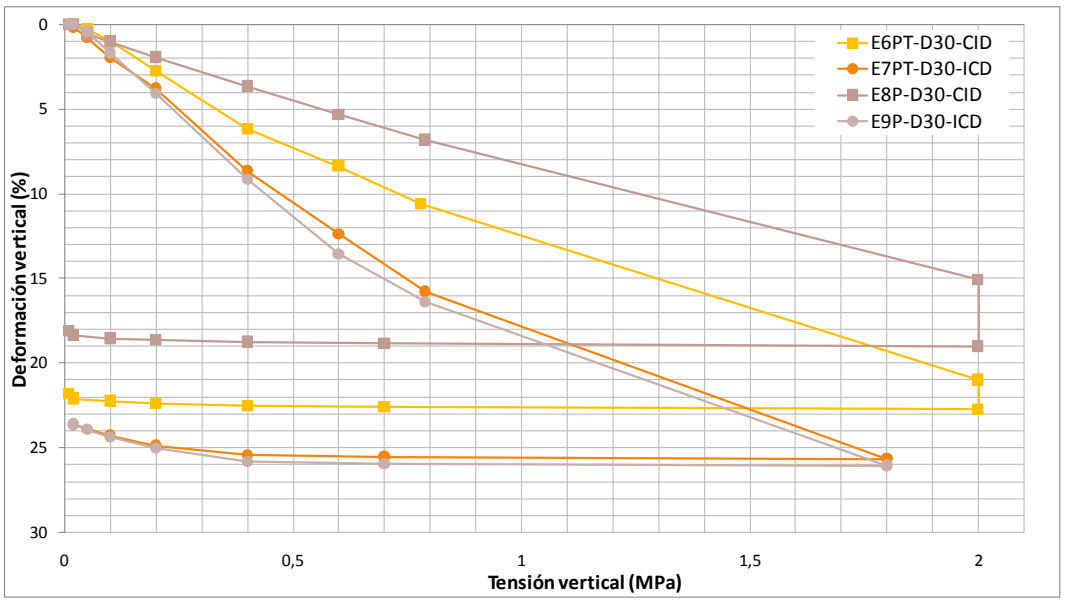


Figura 4-29: Curvas tensión deformación en escala natural. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm y saturación con vapor de agua.

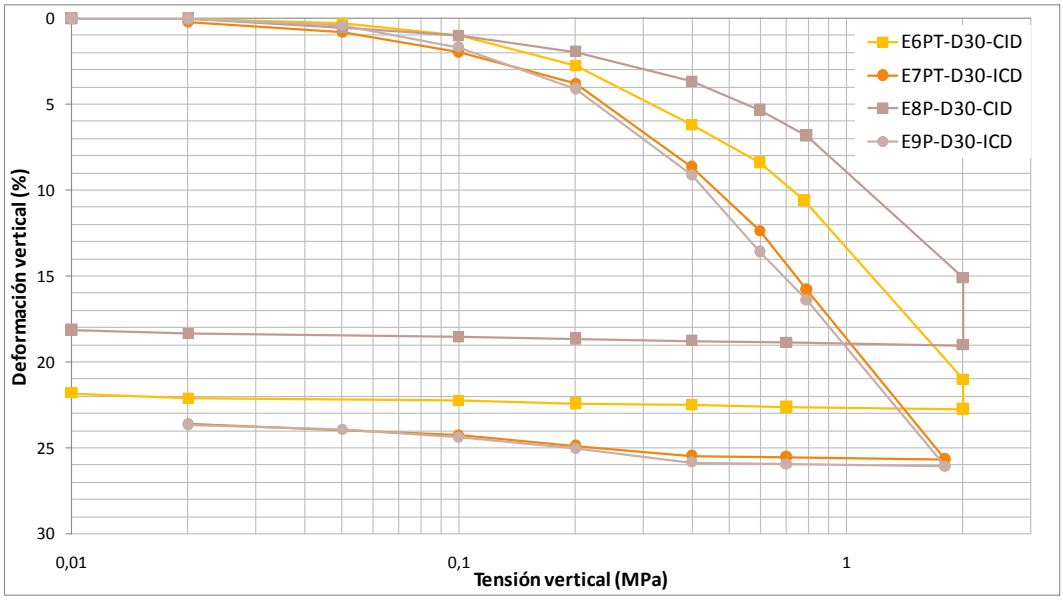


Figura 4-30: Curvas tensión deformación en escala semilogarítmica. Ensayos con granulometría uniforme de diámetro máximo Dmáx= 30 mm y saturación con vapor de agua.

Aunque las deformaciones finales sean menores con la nueva metodología de saturación, el tratamiento hidrófobo permite nuevamente reducir en un 50% la deformación por colapso. Sin embargo, los nuevos ensayos llevados a cabo permiten confirmar que en condiciones secas, la compresibilidad de la escollera es mayor tras el tratamiento hidrófobo. Nuevamente para entender los resultados es necesario proponer hipótesis sobre los fenómenos que se desarrollan al introducir una película hidrófoba. Para explicar este aumento de compresibilidad se podría pensar que el recubrimiento atrapa una cierta humedad adicional en los microporos de las partículas introducida con la inundación de la muestra durante el tratamiento. Una posible solución para evitar este fenómeno sería dejar secar al horno las muestras después del tratamiento para que las gotas de agua atrapadas en las grietas se evaporasen antes que el recubrimiento se adhiera a la superficie.

Los parámetros del modelo constitutivo calculados a partir de los resultados experimentales se resumen en la tabla siguiente:

Parámetro	E6PT-D30-CSD	E7PT-D30-SCD	E8P-D30-CSD	E9P-D30-SCD	Oldecop (2001)	Oldecop (2003)
λ_r (MPa^{-1})	-	-	-	-	-	2,200
λ^i(10^{-2}MPa^{-1})	14,34	-	8,750	-	2,310	1,605
λ_0^d(10^{-2}MPa^{-1})	-	7,068	-	15,04	5,108	6,305
λ(10^{-2}MPa^{-1})	11,54	11,47	8,920	11,28	-	-
σ_y (MPa)	-	-	-	-	0,29	0,2
κ (10^{-2}MPa^{-1})	0,342	0,871	0,338	0,449	0,257	0,092
χ_φ(10^{-2}MPa^{-1})	0,270	-	0,606	-	0,2047	0,599
α_φ(10^{-2}MPa^{-1})		1,094	-	2,328	0,786	0,599
κ_φ(10^{-2}MPa^{-1})	-	-	-	-	0,042	0,033
$\varepsilon_{colapso}$ (%)	1,75	-	3,93	-	1,4	7,5

Tabla 4-9 : Parámetros del modelo constitutivo determinados a partir de los resultados experimentales.

Se ha tomando el valor de los parámetros obtenidos en los 9 ensayos realizados, clasificados en dos grupos según si el material ha sido o no tratado, para compararlos. Tal y como ya se ha comentado anteriormente, cabe destacar la homogeneidad del parámetro λ indistintamente del método de saturación escogido y de la naturaleza del material. A partir de la figura 4-31 también se aprecia un aumento significativo de la compresibilidad en seco λi una vez aplicado el tratamiento. Sin embargo, cuando la estructura se carga en condiciones saturadas, si que se ha demostrado la eficacia del recubrimiento hidrófobo.

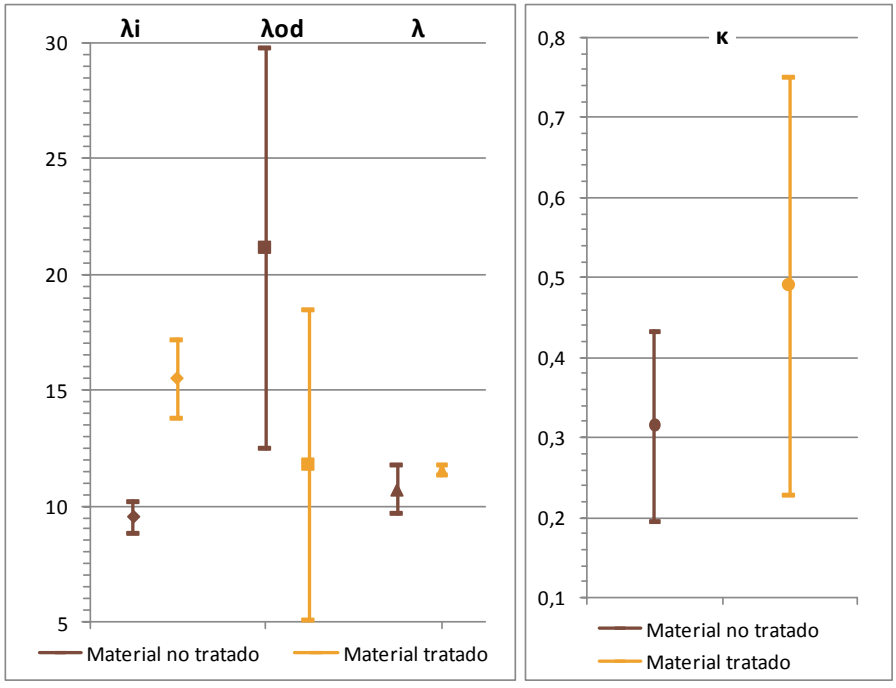
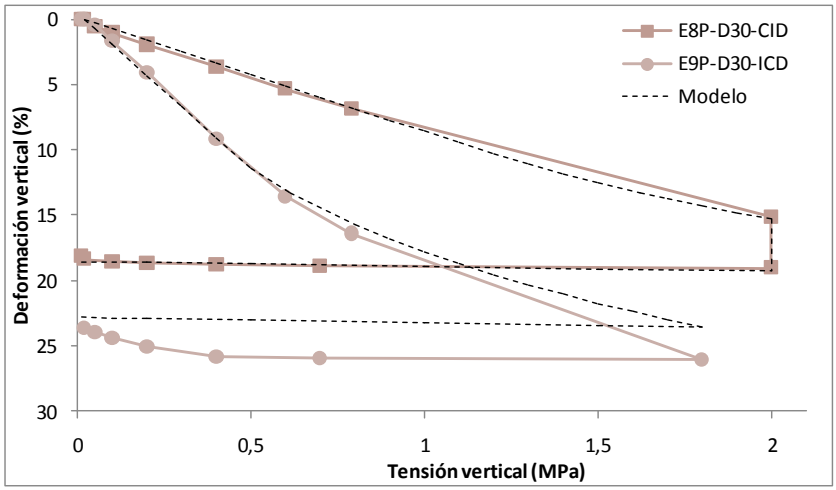
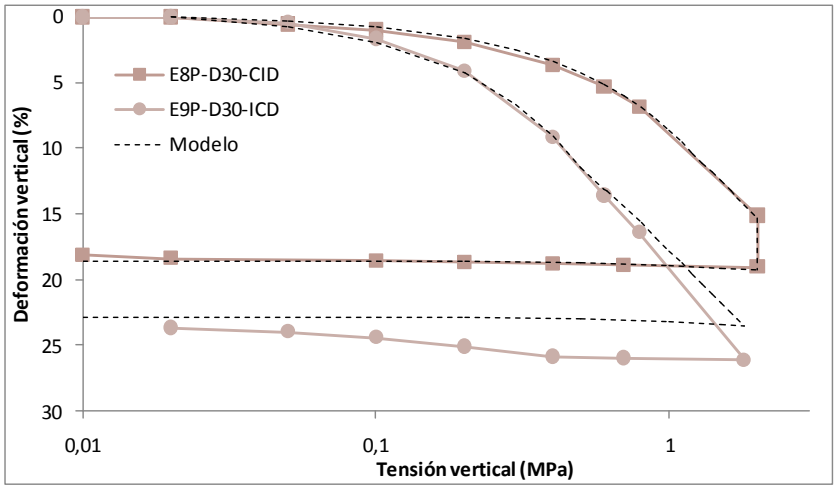


Figura 4-31 : Comparativa de los parámetros básicos del modelo constitutivo entre el material natural y el material tratado.

Introduciendo los nuevos parámetros en el modelo se calculan las curvas teóricas para la pizarra natural y para la pizarra hidrófoba.

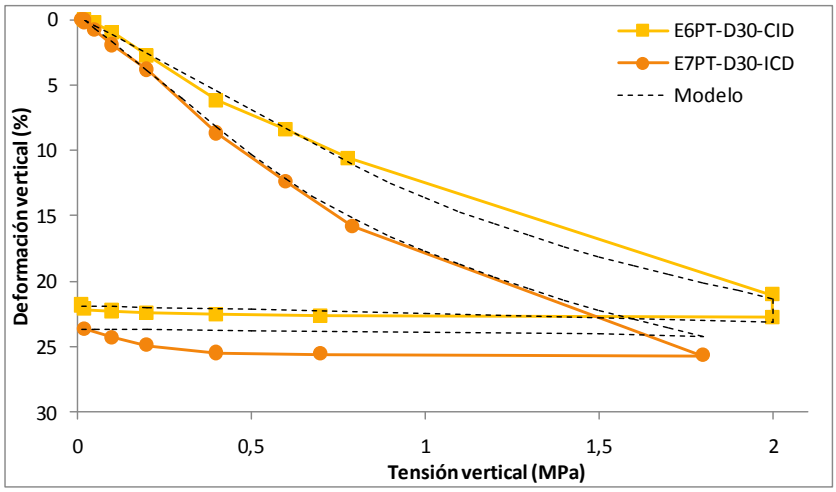


(a)



(b)

Figura 4-32: Comparativa entre los resultados experimentales con material natural y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica.



(a)

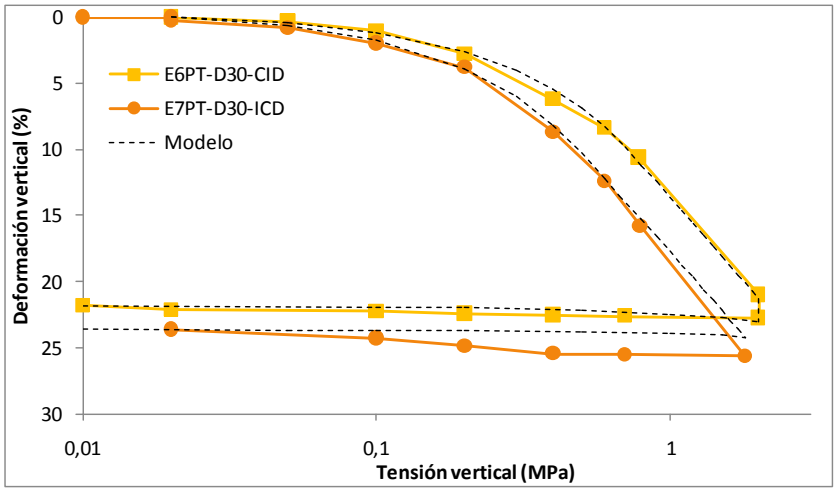


Figura 4-33 : Comparativa entre los resultados experimentales con material con recubrimiento hidrófobo y el modelo constitutivo. (a) Escala natural y (b) escala semilogarítmica.

El segundo programa de ensayos ha sido útil des del punto de vista de comprobación de resultados. Tras su realización se puede afirmar que la escollera tratada presenta una compresibilidad mayor en seco. Este comportamiento se plasma en la forma de las superficies de fluencia. Estableciendo una comparativa entre el modelo con pizarra natural y el modelo con pizarra hidrófoba, vemos que en succiones altas el tratamiento tiene consecuencias negativas. Por el contrario, en condiciones saturadas, se aprecia una leve mejora expresada en el parámetro λ_0^d. Este comportamiento se traduce en unas superficies de fluencia más verticales que se cruzan con las superficies de fluencia análogas en succiones próximas a cero.

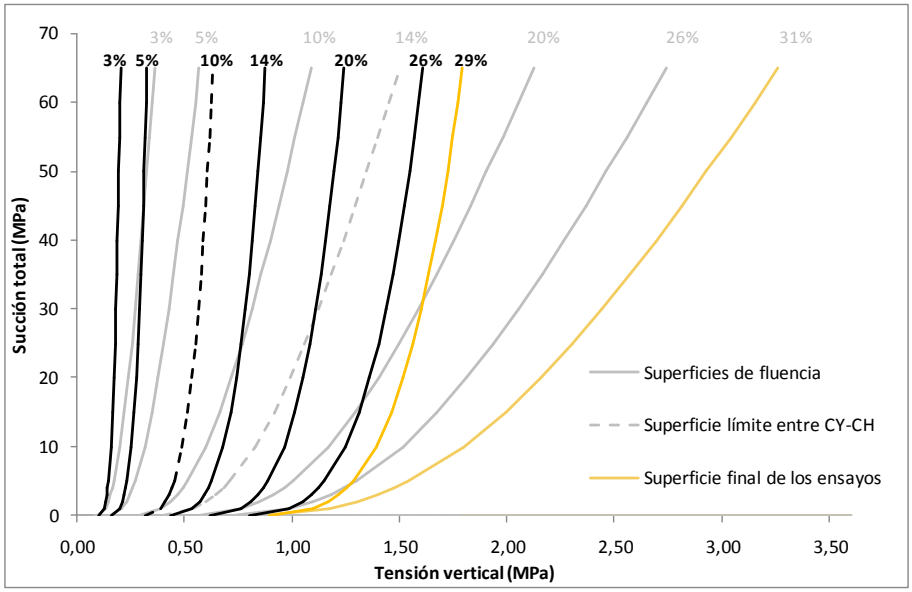


Figura 4-34: Comparativa entre las superficies de fluencia correspondientes a la pizarra natural y la pizarra hidrófoba.

4.3.4. DEFORMACIÓN DEPENDIENTE DEL TIEMPO.

A continuación, se analizará el comportamiento de la escollera en función del tiempo. Para ello, se ha trabajado dentro del marco teórico propuesto por Oldecop y Alonso (2007) descrito anteriormente. Cabe destacar la existencia de una relación única entre

la deformación, la tensión, la succión total y el tiempo cuando se somete el material a fluencia a largo plazo. Esta relación consiste en una relación lineal entre la deformación y el tiempo en escala logarítmica.

$$\lambda^t = \frac{d\varepsilon}{d(Ln\ t)} \qquad (33)$$

El cambio de comportamiento, diferido en el tiempo, se puede explicar con la propagación subcrítica de fisuras y su velocidad. En un primer instante, bajo una misma carga, las grietas se abren más lentamente. A medida que la apertura de la grieta va creciendo, el factor de intensidad K va aumentando hasta un punto crítico en que la propagación se dispara y, como consecuencia, la partícula se rompe. El tiempo necesario hasta la rotura depende substancialmente de la apertura de grieta inicial. Para pequeños cambios en la apertura inicial se obtienen tiempos de varios órdenes de magnitud.

Para el análisis se han tomado como datos los valores de deformación observados a lo largo de la realización de cada ensayo edométrico. Estos valores consisten en la deformación a lo largo del tiempo bajo carga constante. Oldecop y Alonso (2007) observaron que el comportamiento lineal aparece al cabo de tiempos bajos (menores de 10 minutos). Este rango de valores se ajusta a los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio, motivo por el cual, el índice de compresibilidad dependiente del tiempo se computará con los datos a partir de un ciento umbral. En las gravas calizas, menos deformables, se tomaron los datos correspondientes a t >10 min. En cambio, en las pizarras del río Pancrudo la fluencia se estabiliza más rápidamente puesto que las partículas se rompen más rápidamente. En este segundo material se consideraron los datos correspondientes a t >1 min. Por otro lado, las diferentes tensiones aplicadas corresponden a los escalones de carga propuestos en las trayectorias tensionales.

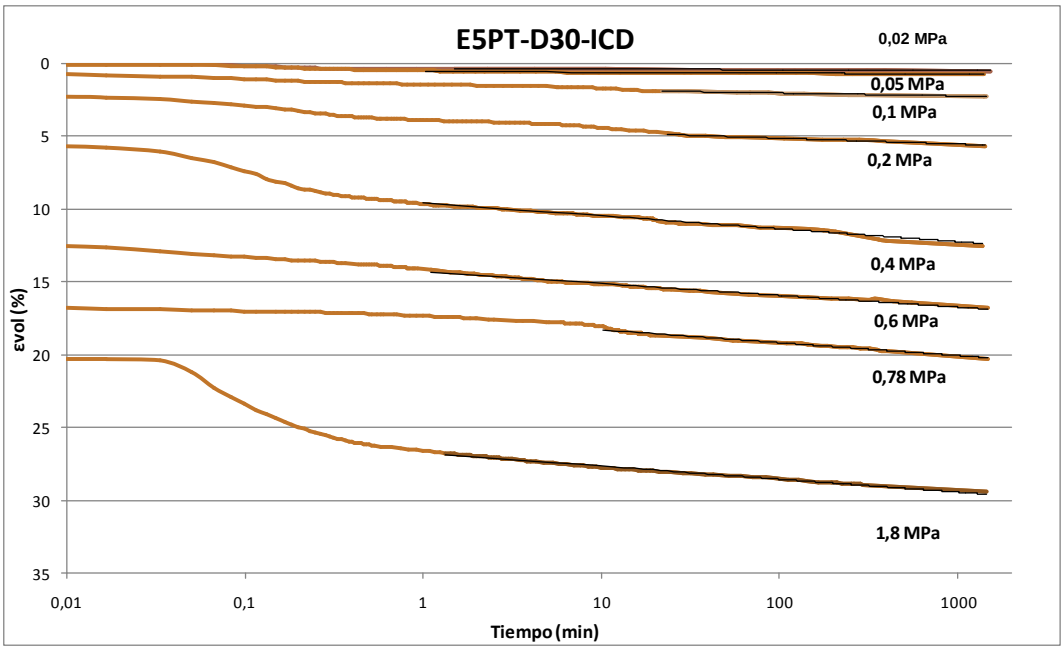


Figura 4-35 : Curvas deformación-tiempo del ensayo E5PT-D30-ICD.

A partir de las curvas de tiempo - deformación en escala semilogarítmica se obtienen los valores del índice de compresibilidad dependiente del tiempo. Si se dibujan estos conjuntos de puntos en función de la carga aplicada se obtienen los gráficos representados en las figuras 4-36 y 4-37 a los que se ha realizado un ajuste lineal.

En primer lugar, tenemos los resultados correspondiendo a los ensayos con ambos materiales de estudio y con una granulometría uniforme de diámetro Dmáx = 15 mm.

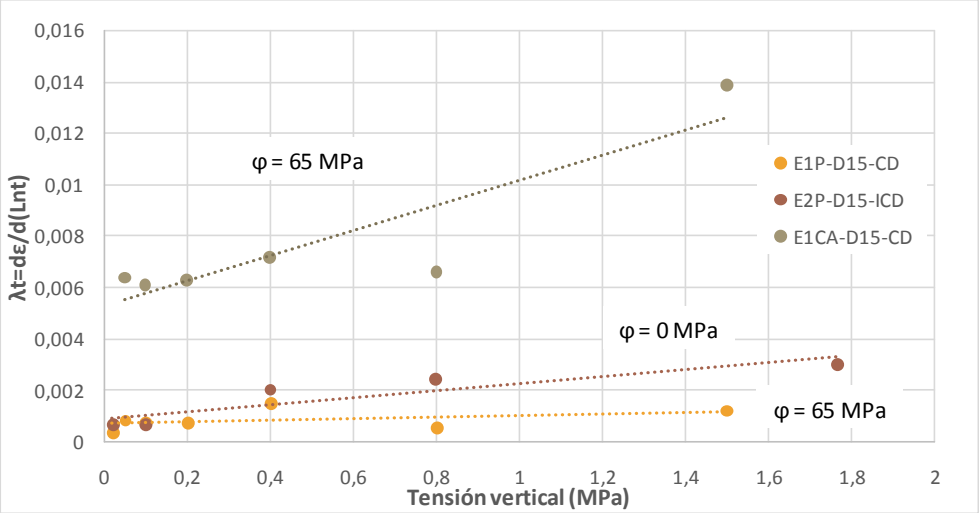
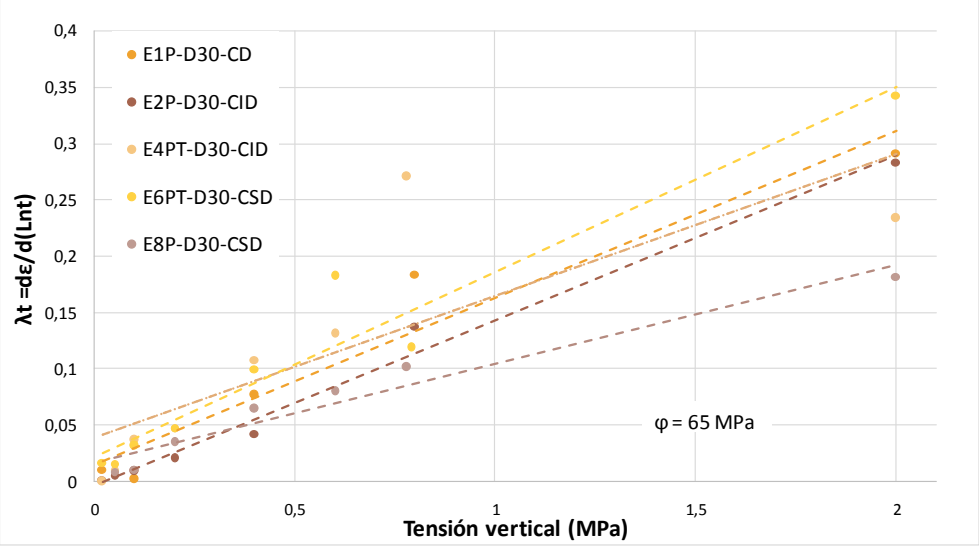
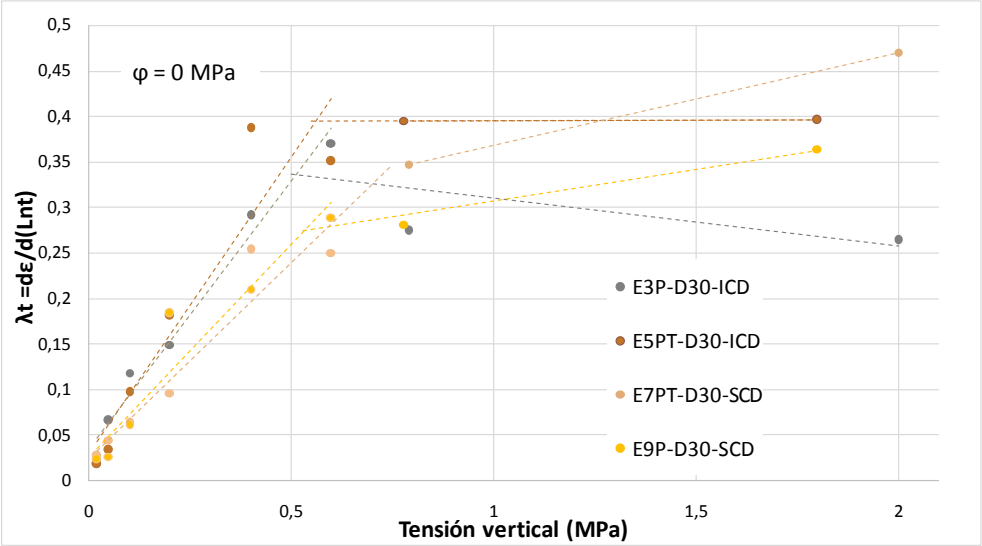


Figura 4-36: Compresibilidad dependiente del tiempo .Ensayos preliminares.

Seguidamente se han agrupado los ensayos con pizarras del río Pancrudo con tamaños mayores comprendidos entre 20 – 30 mm. En la misma figura se presentan los resultados del material en su estado natural y con el tratamiento hidrófobo.



(a)



(b)

Figura 4-37 : Compresibilidad dependiente del tiempo. (a) Trayectorias en seco y (b) trayectorias con saturación inicial.

Las compresibilidades dependientes del tiempo obtenidas presentan las mismas formas que las consultadas en la literatura (ver figura 2-15). En condiciones secas, la evolución de la compresibilidad con la carga se ajusta bien a una recta. Por el contrario, en condiciones saturadas la interpretación de es más compleja. Para cargas pequeñas, la compresibilidad aumenta con la carga siguiento una recta con pendiente mayor mientras que, en cargas altas, los valores se estabilizan permaneciendo contantes.

Otra conclusión es que el tratamiento no influye en las deformaciones por fluencia. La pendiente de las rectas correspondientes a los ensayos con la pizarra hidrófoba pertenece al mismo rango que la del material natural para ambos tipos de trayectorias.

5. CONCLUSIONES

La deformabilidad de las escolleras ha sido observada desde las primeras construcciones de presas con espaldones de dicho material. El estudio de los movimientos registrados ha permitido relacionar los episodios de colapso, bajo carga constante, con la saturación de la estructura en escollera. El fenómeno de rotura de partículas que aparece durante el colapso ha sido también verificado en el laboratorio. Se ha demostrado que incrementando la humedad relativa del ambiente de la muestra, y, esencialmente en las grietas de las partículas, aparece la llamada propagación subcrítica de fisuras. Este comportamiento puede ser explicado mediante la mecánica de fractura. Oldecop y Alonso (2001) estudiaron el efecto de la humedad relativa en el comportamiento de las escolleras y la relacionaron con la velocidad de propagación de fractura y el factor de intensidad de tensiones. Fueron dichos autores quienes propusieron el modelo constitutivo elastoplástico empleado en el presente estudio.

El impacto de la humedad relativa en las escolleras ha sido ampliamente estudiado en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB). Se han llevado a cabo múltiples estudios en los que se han realizado extensos programas experimentales para determinar qué influencia tienen en su comportamiento las distintas características de las escolleras.

Siguiendo esta línea de investigación, el principal objetivo de la presente tesina ha sido estudiar la contribución de un posible recubrimiento hidrófobo en las partículas de grava. Se pretendió analizar la deformabilidad y, como consecuencia, la propagación de fisuras que provoca el colapso en una estructura formada por un conjunto de partículas tratadas. Con este fin se llevaron a cabo ensayos en las mismas condiciones, unos con gravas naturales y otros con gravas tratadas hidrofóbicamente.

Se ejecutaron distintos ensayos con un mismo material (Pizarras del río Pancrudo), con la misma granulometría uniforme (retenida entre los tamices UNE 20 mm y UNE 30 mm) y con el mismo equipo del Departamento utilizando en anteriores estudios. Se realizaron ensayos de compresión uniaxial de una partícula irregular entre dos placas de acero junto con ensayos edométricos con un equipo Rowe de Φ=150 mm. Se aplicó la carga con una prensa y con aire comprimido ($\sigma_{máx}$=2 MPa) respectivamente. Las condiciones de succión en el edómetro fueron impuestas mediante dos técnicas distintas. Por un lado se realizó un primer programa de ensayos con inundación directa de la muestra con agua desionizada líquida. Posteriormente, se repitieron los ensayos con un control de succión mediante la técnica de circulación de aire en un circuito cerrado. Las condiciones impuestas correspondieron a una humedad del 100% que se alcanzó con el equilibrio entre el aire bombeado y el agua desionizada líquida colocada en un recipiente conectado al circuito.

El material preparado para el estudio se dividió en dos cantidades, una de las cuales se trató con un agente hidrófobo. Tras estudiar distintas alternativas para el recubrimiento se escogió tratar la pizarra con Dimethyldiclorosilano (DMDCS) debido a la posibilidad de una aplicación directa y a la mayor literatura disponible. La concentración en masa empleada fue del 0,5% aunque se sospecha que con concentraciones menores se habrían alcanzado los mismos resultados. El

procedimiento seguido consistió en mezclar inicialmente la cantidad necesaria de DMDCS para la muestra a tratar con un volumen de agua desionizada suficiente para cubrir la muestra. Una vez se observaba que la reacción química había empezado se agregaban las muestras de pizarra y se dejaban sumergidas dos días en el interior de un desecador. Finalmente se retiraba el excedente líquido y se dejaban secar las muestras al aire.

Para comprobar el grado de mojabilidad adquirido se midió el ángulo de contacto con un método similar al SDM. Se consiguió pasar de una mojabilidad completa (0º) a una superficie hidrófoba (≈100º). La forma y rugosidad de la superficie no influye significativamente en el ángulo de contacto puesto que la escala es macroscópica. En definitiva, el recubrimiento hidrófobo desarrollado consiste en una película fina invisible adherida superficialmente a las partículas. Se destaca el hecho de que consista en un tratamiento superficial ya que tiene una importancia relevante en el comportamiento de las escolleras observado.

Los ensayos de compresión uniaxial entre placas de acero permitieron simular las fuerzas de contacto en una partícula individual. Los resultados obtenidos verificaron la eficiencia del recubrimiento hidrófobo. En el grupo de partículas no tratadas se percibió una disminución significativa de la resistencia cuando el ensayo se desarrollaba en condiciones mojadas frente a las condiciones del ambiente. Por el contrario, cuando se procedió a realizar los mismos ensayos con pizarras hidrófobas, el comportamiento y la resistencia a la rotura coincidieron tanto en condiciones con la HR del ambiente y con un 100% de HR. La resistencia calculada corresponde a la resistencia pico antes de la rotura diametral de la partícula.

Para estudiar el comportamiento global de una estructura de escollera se realizaron ensayos edométricos con una célula Rowe de Φ=150 mm. La granulometría escogida corresponde al diámetro máximo de partícula recomendado para las dimensiones del equipo. De cada ensayo realizado se obtuvieron las curvas tensión-deformación, las curvas de deformación-tiempo y las curvas granulométricas finales. Las granulometrías tras el ensayo permitieron calcular los parámetros de rotura y la dimensión fractal para evaluar el grado de rotura de la muestra.

La interpretación de los resultados expresados en las curvas de tensión-deformación resulta compleja. Por un lado se observa que durante la saturación bajo carga constante (2 MPa) la implementación del tratamiento hidrófobo permite reducir en un 50% la deformación de colapso. Sin embargo, la compresibilidad en seco (λ^i) se ve significativamente aumentada con el uso de un recubrimiento hidrófobo. Se piensa que este aumento de compresibilidad podría estar asociado al hecho que el recubrimiento atrape la humedad en las grietas existentes. En otras palabras, se piensa que las fisuras quedan rellenas de agua y que a su vez, la película hidrófoba bloquea la salida de esta. Este fenómeno se produce ya que durante el tratamiento hidrófobo es necesario saturar las muestras con una mezcla de agua y DMDCS. Estos dos fenómenos contrarios hacen que de forma global, la deformación final tome el mismo orden de magnitud para las trayectorias Carga-Inundación-Descarga. Si se aumenta la carga en condiciones inicialmente saturadas, nuevamente, el tratamiento hidrófobo contribuye en la ligera disminución de la deformabilidad (λ_0^d). En definitiva, el carácter

superficial del recubrimiento hidrófobo hace que una vez se haya producido una rotura en una partícula esta sea nuevamente vulnerable al agua.

Finalmente, las curvas deformación-tiempo mostraron que la compresibilidad dependiente del tiempo (λ^t) no se ve modificada con el recubrimiento hidrófobo. Las formas obtenidas para los valores de compresibilidad dependiente del tiempo–tensión vertical se ajustan perfectamente a los resultados presentes en la literatura. En condiciones saturadas las fisuras se propagan más rápidamente hasta llegar a un valor constante de λ^t. En cambio, en condiciones secas, la compresibilidad dependiente del tiempo es menor y aumenta linealmente con la carga.

El modelo constitutivo elastoplástico empleado permite cuantificar las observaciones de la deformación experimentada. Para cada ensayo se han calculado los seis parámetros que definen el modelo. Comparando el valor de los parámetros de compresibilidad ($\lambda^t, \lambda_0^d \; y \; \lambda^i$) para las distintas trayectorias se validan los fenómenos descritos anteriormente. El modelo reproduce las trayectorias tensión-deformación seguidas en los ensayos realizados. Cabe destacar que el parámetro con menos variabilidad es la compresibilidad cuando se desarrolla el endurecimiento clástico (λ). Su valor no se ve afectado ni por el método de imposición de succión, ni por el tipo de trayectorias seguidas ni tampoco por el recubrimiento hidrófobo. Bajo el endurecimiento clástico se observa la linealidad de las líneas de consolidación normal en escala semilogarítmica. Este fenómeno aparece porque las partículas con tamaños menores se rompen con mayor facilidad dado que su número de coordinación es menor. No sorprende que λ no se vea modificado con el tratamiento hidrófobo. Las partículas de tamaños menores son aquellas fruto de la rotura de partículas y por lo tanto, el recubrimiento hidrófobo ya no es continuo en ellas. De este modo, las partículas que continúan rompiéndose son aquellas con características similares a la pizarra natural.

5.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante la realización del presente trabajo aparecieron cuestiones teóricas relacionadas con los fenómenos observados con la implementación del recubrimiento hidrófobo.

Una de las principales preguntas que han surgido con los resultados de la campaña experimental es cómo se comporta el recubrimiento frente al vapor de agua. Otro fenómeno que no se ha demostrado es el motivo de la disminución de la compresibilidad con el tratamiento en condiciones secas. Para estudiar este fenómeno es importante tener en cuenta que las escolleras son porosas y que, por lo tanto, durante el tratamiento es posible que sus propios poros se saturen con una cierta humedad. Se propone realizar una nueva campaña de ensayos con partículas de cristal para poder observar así la contribución de la porosidad en la compresibilidad de las escolleras hidrófobas.

Otra futura línea de investigación podría centrarse en estudiar que implica el carácter superficial del tratamiento hidrófobo. Se ha observado que el comportamiento de las gravas hidrófobas es distinto a nivel individual y a nivel global. Una vez aparece la primera rotura, las dos nuevas partículas son vulnerables al agua en las nuevas superficies creadas por la rotura. Introduciendo un análisis basado en modelos de

elementos discretos (DEM) se podría estudiar con más precisión la evolución de la rotura y la relación de esta con la localización de las superficies hidrófobas. Además, sería interesante poder correlacionar experimentalmente la evolución de la rotura con el modelo DEM. Para este análisis se podría desarrollar un nuevo equipo donde se pudiera seguir la evolución de la rotura de una estructura de escollera mediante un análisis fotográfico. La estructura tendría que consistir en una superficie plana formada por una hilera de partículas para que todas las partículas de la estructura fueran visibles.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, E. E. (2003). Exploring the limits of unsaturated soil mechanics: the behaviour of coarse granular soil and rockfill. *The 11th Spencer J. Buchanan Lecture.* College Station.

Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique, 40* (3), 405-30.

Alonso, E. E., Olivella, S., & Pinyol, N. (2005). A review of Beliche Dam. *Géotechnique, 55* (4), 267-285.

Alonso, E. E., Romero, E. E., & Ortega, E. (2016). Yielding of rockfill in relative humidity-controlled triaxial experiments. *Acta Geotechnica, 11* (3), 456-477.

Atkinson, B. K., & Meredith, P. G. (1987). The theory of subcritical crack growth with applications to mineral rocks. In B. K. Atkinson, *Fracture mechanics of rock* (pp. 111-166). London: Academic Press.

Bachmann, J., & McHale, G. (2009). Superhydrophobic surfaces: a model approach to predict contact angles and surface energy of soil particles. *European Journal of Soil Science , 60*, 420-430.

Bachmann, J., Ellies, A., & Hartge, K. H. (2000). Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency. *Journal of Hydrology , 231-232*, 66-75.

Bachmann, J., Woche, S. K., Goebel, M. O., Kirkham, M. B., & Horton, R. (2003). Extended methodology for determining wetting properties of porous media. *Water resources research , 39* (12).

Banerjee, S. (2008). *Simple derivation of Young, Wenzel and Cassie-Baxter equations and its interpretations.* Saha Institute of Nuclear Physics, Surface Physics Division, Kolkata.

Biolin Scientific. *Influence of surface roughness on contact angle and wettability.* Theory note 7.

Broek, D. (1985). *Elementary engineering fracture mechanics* (4th edn. ed.). Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.

Cañavate, A. (2010). *Influencia de la forma de las partículas en la compressibilidad de las escolleras.* Proyecto final de màster, Universitat Politècnica de Catalunya, ETSICCPB.

Cavarretta, I., & O'Sullivan, C. (2012). The mechanics of rigid irregular particles subject to uniaxial compression. *Géotechnique , 62* (8), 681-692.

Chau, T. T. (2009). A review of techniques for measurement of contact angles and their applicability on mineral surfaces. *Minerals Engineering , 22*, 213-219.

Chávez, C., Romero, E., & Alonso, E. E. (2009). A Rockfill Triaxial Cell with Suction Control. *Geotechnical Testing Journal , 32* (3).

Da Re, G. (2000). *Physical mechanisms of controlling the pre-failure stress-strain behaviour of frozen sand.* Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Science reviews , 51* (1-4), 33-65.

Hardin, B. O. (1985). Crushing of Soil Particles. *Journal of Geotechnical Engineering* , 1177-1192.

Hardin, B. O. (1985). Crushing soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering , 111* (10), 1177-1192.

Hueso, O. (2004). *Compresibilidad de las escolleras.* Tesina final de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, ETSICCP.

Indraratna, B. (2011). *Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track.* CRC Press.

Ju, Z., Ren, T., & Horton, R. (2008). Influence of Dichlorodimethylsilane Treatment on Soil Hydrophobicity, Thermal Conductivity, and Electrical Conductivity. *Soil Science , 72* (7), 425-432.

Kim, D. H., Kim, Y. J., Lee, J. S., & Yun, T. S. (2011). Thermal and Electrical Response of Unsaturated Hydrophilic and Hydrophobic Granular Materials. *Geotechnical Testing Journal , 34* (5).

Lee, C., Yang, H. J., Yun, T. S., Choi, Y., & Yang, S. (2015). Water-Entry pressure and Friction Angle in an Artificially Synthesized Water-Repellent Silty Soil. *Vadose Zone Journal , 14* (4).

Lee, D. M. (1992). *The angles of friction of granular fills.* Ph.D. dissertation, Univeristy of Cambridge.

Lourenço, S. N., Gallipoli, D., Augarde, C. E., Toll, D. G., Fisher, P. C., & Congreve, A. (2012). Formation and evolution of water menisci in unsaturated granular media. *Géotechnique , 62* (3), 193-199.

Lourenço, S. N., Wang, G. H., & Kamai, T. (2015). Process in model slopes made of mixtures of wettable and water repellent sand: Implications for the initiation of debris flows in dry slopes. *Engineering Geology , 196*, 47-58.

Ma, M., & Hill, R. M. (2006). Superhydrophobic surfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science , 11*, 193-202.

Marachi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B., & Duncan, J. M. (1969). *Strength and deformation characteristics of rockfill materials.* Department of Civil Engineering, University of California.

Marmur, A. (1994). Thermodynamic aspects of contact angle hysteresis. *Advances in Colloid and Interface Science , 50*, 121-141.

Marsal, J. R. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division , 93* (2), 27-43.

Marsal, R. J. (1973). Mechanical properties of rockfill. In R. C. Hirschfeld, & S. J. Poulos, *Embankment Dam Engineering* (Vol. Casagrande Volume). John Wiley & Sons.

McDowell, G. M., & Bolton, M. D. (2000). On the micromechanics of crushable aggregatesq. *Géotechnique , 50* (3), 315-318.

McDowell, G. R., & Bolton, M. D. (1998). On the micromechanics of crushable aggregates. *Géotechnique , 48* (5), 667-679.

McDowell, G. R., & de Bono, J. P. (2013). On the micro mechanics of one-dimensional normal compression. *Géotechnique , 63* (11), 895-908.

McDowell, G. R., Bolton, M. D., & Robertson, D. (1996). The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids , 44* (12), 2079-2102.

Medeiros, M. F., Real, L. V., Quarcioni, V. A., & Helene, P. (2015). Concrete with treated surface and exposed to chlorides solutions: thickness of equivalent coatings. *ALCONPAT Journal , 5* (3), 219-233.

Montobbio, D. (2001). *Efecto de la granulometría en la compresibilidad de las escolleras.* Tesina de especialización, Universitat Politècnica de Catalunya, ETSECCPB.

Nara, Y., Marimoto, K., Yoneda, T., Hiroyoshi, N., & Kaneko, K. (2011). Effects of humidity and temperature on subcritical crack growth in sandstone. *International Journal of Solids and Structures , 48*, 1130-1140.

NG, S. Y., & Lourenço, S. N. (2015). Conditions to induce water repellency in soils with dimethyldichlorosilane. *Géotechnique , 66* (5), 441-444.

Nobari, E. S., & Duncan, J. M. (1972). *Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams.* Report No. TE-72-1, University of California, Department of Civil Engineering.

Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2009). Superhydrophobic surfaces and emerging applications: Non-adhesion, energy, green engineering. *Current Opinion in Colloid & Interface Science , 14*, 270-280.

Oldecop, L. A., & Alonso, E. E. (2013). Rockfill mechanics. In C. e. al., *Advances in Unsaturated Soils* (pp. 61-86). Londres: Taylor & Francis Group.

Oldecop, L., & Alonso, E. E. (2001). A model for rockfill compressibility. *Géotechnique , 51* (2), 127-139.

Oldecop, L., & Alonso, E. E. (2003). Suction effects on rockfill compressibility. *Géotechnique , 53* (2), 289-292.

Oldecop, L., & Alonso, E. E. (2004). Testing rockfill under relative humidity control. *Geotechnical Testing Journal , 27* (3).

Oldecop, L., & Alonso, E. E. (2007). Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill. *Géotechnique , 57* (3), 289-301.

Ortega Iturralde, E. F. (2008). *Comportamiento de materiales granulares gruesos. Efecto de la succión.* Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.

Park, E. J., Cho, Y. K., Kim, D. H., Jeong, M., & Kim, Y. H. (2014). Hydrophobic Polydimethylsiloxane (PDMS) Coating of Mesoporous Silica and Its Use as a Preconcentrating Agent of Gas Analytes. *Langmuir , 30* (34), 10256-10262.

Parkin, A. K., & Aust, M. E. (1997). The compression of Rockfill. *Australian Geomechanics Journal* .

Ramírez-Flores, J. C., Bachmann, J., & Marmur, A. (2010). Direct determination of contact angles of model soils in comparison with wettability characterization by capillary rise. *Journal of Hydrology , 382*, 10-19.

Ramon, A., Alonso, E. E., & Romero, E. E. (2008). Grain size effects on rockfill constitutive behaviour. *Proc. of the 1st Europ. Conf. on Unsaturated Soils* (pp. 341-347). Durham: Taylor and Francis.

Selander, A. (2010). *Hydrophobic Impregnation of Concrete Structures.* TRITA-BKN. Bulletin 104, Royal Institute of Technology.

Sowers, G. F., Williams, R. C., & Wallace, T. S. (1965). Compressibility of broken rock and settlements of rockfills. *Proc. 6th ICSMFE*, *2*, pp. 561-565. Montréal.

Tapias, M., Alonso, E. E., & Gili, J. A. DEM modelling of unsaturated rockfill. Scale effects. *First Panamerican Conference on Unsaturated Soils.* Cartagena de Indias. Colombia.

Truong, Q. H., Lee, J. S., Dong, Y., & Yun, T. S. (2001). Capillary induced small-train stiffness for hydrophilic and hydrophobic granular materials: experimental and numerical studies. *Soils and Foundations , 51* (4), 713-721.

Tuller, M., & Or, D. (2004). Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. *Encyclopedia of Soils in the Environment , 4*, 278-289.

Uemoto, k. L., Agopyan, V., & Vittorino, F. (2001). Concrete protection using acrylic latex paints: Effect of the pigment volume content on water permeability. *Materials and Structures , 34*, 172-177.

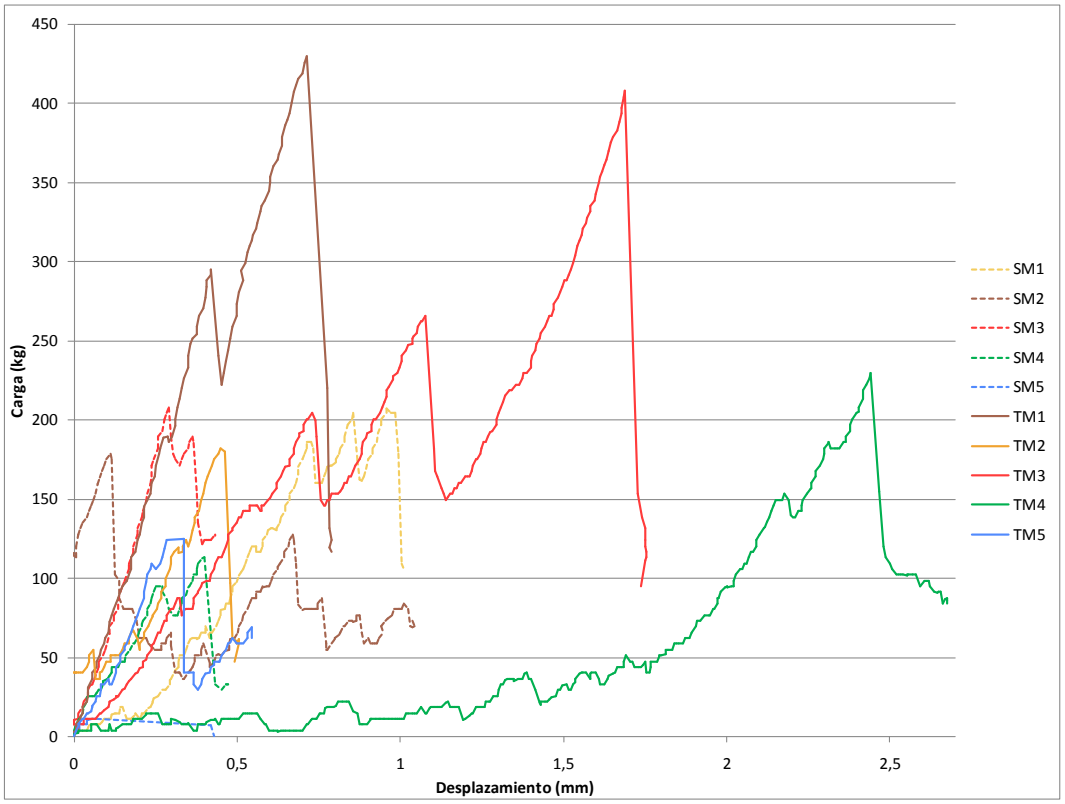
Yan, Y. Y., Gao, N., & Barthlott, W. (2011). Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process. A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science , 169*, 80-105.

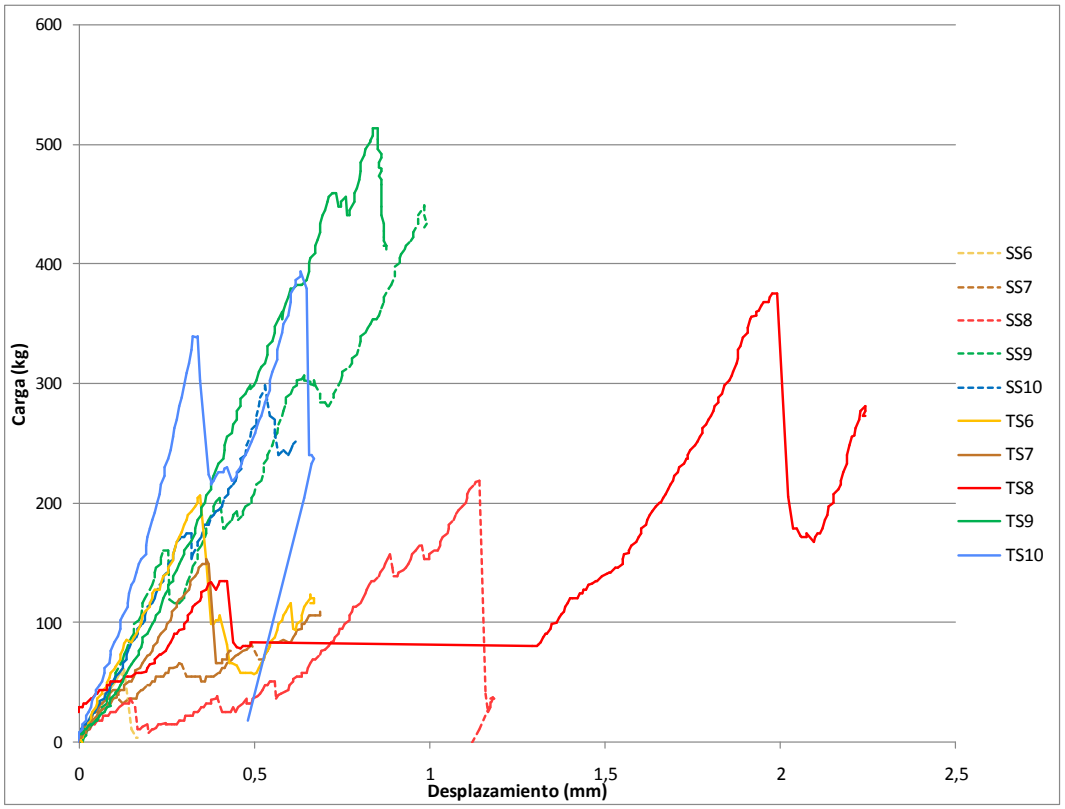
Yuan, Z., Bin, J., Wang, X., Wang, M., Huang, J., Peng, C., et al. (2014). Preparation of a polydimethysiloxane (PDMS)/CaCO3 based superhydrophobic coating. *Surfaces & Coatings Technology , 254*, 97-103.

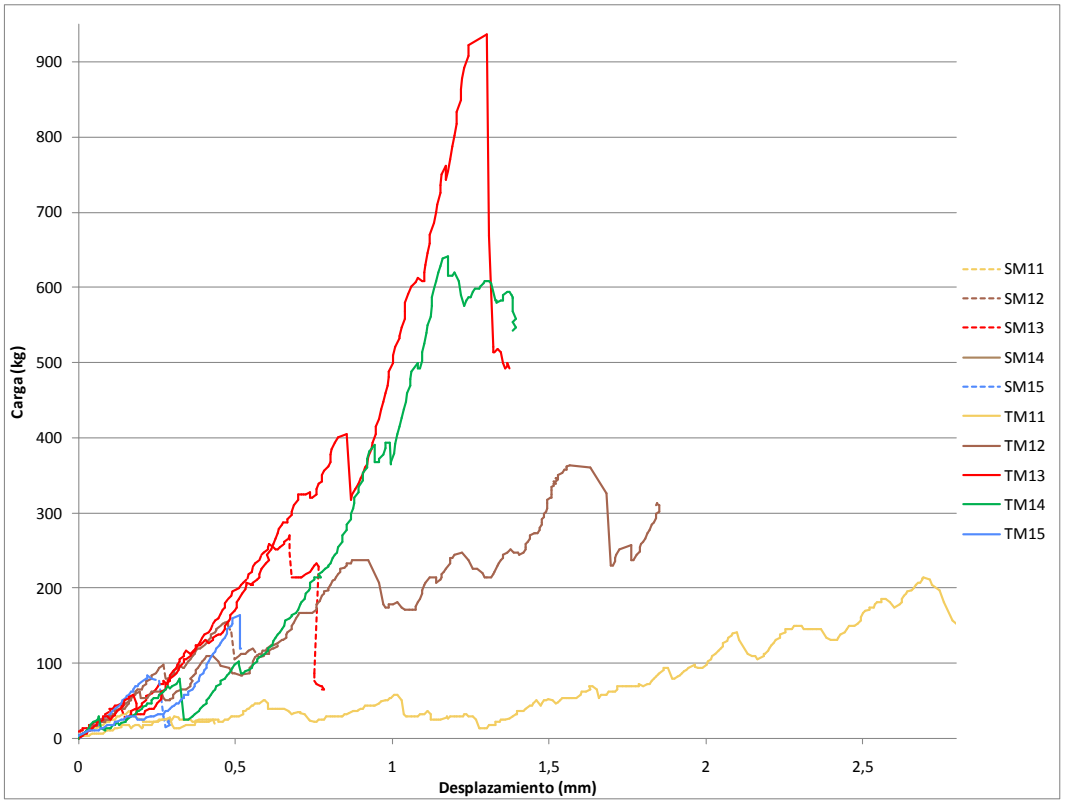
Zhang, M., Feng, S., Wang, L., & Zheng, Y. (2016). Lotuus effect in wetting and self-cleaning. *Biotribology , 5*, 31-43.

ANEJO I: RESULTADOS

ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL DE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO







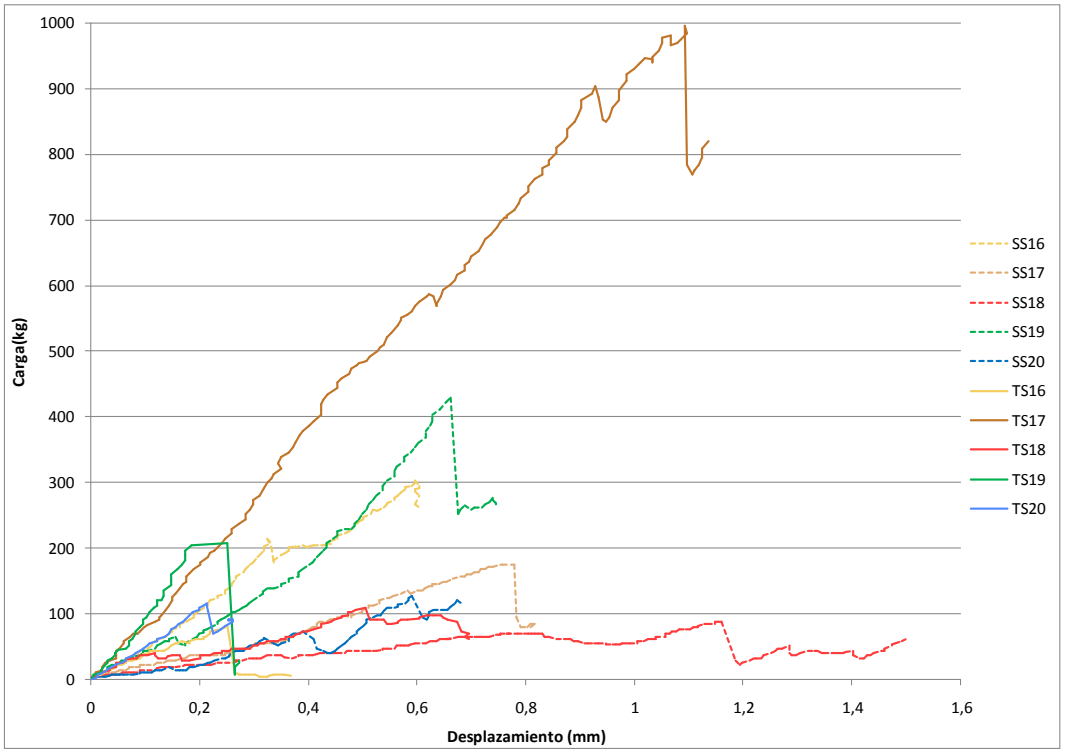


Figura 0-1 : Relación desplazamiento – carga de las 40 partículas ensayadas clasificadas en 4 categorías. En líneas continuas material tratado y en discontinuas material natural.

CURVAS SUCCIÓN-DEFORMACIÓN VERTICAL DURANTE EL COLAPSO

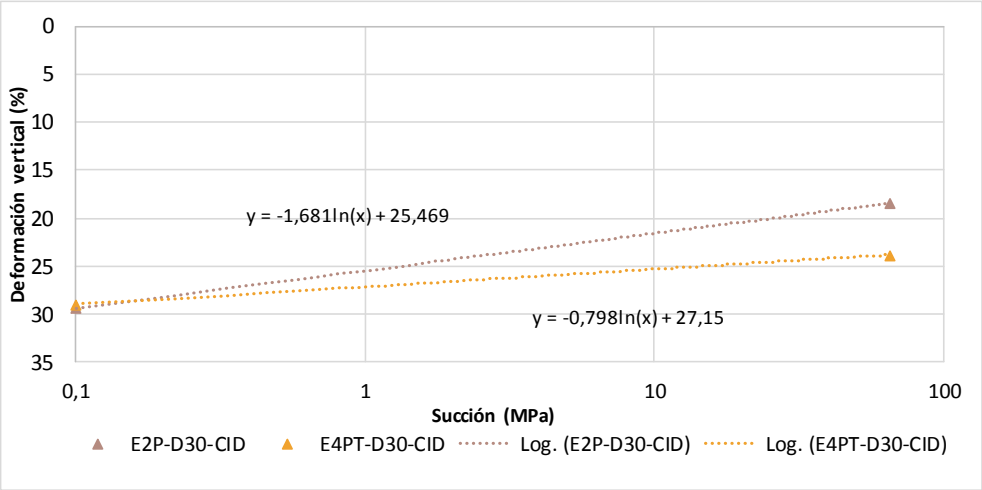


Figura 0-2: Curvas succión-deformación vertical durante el colapso para los ensayos en pizarras naturales.

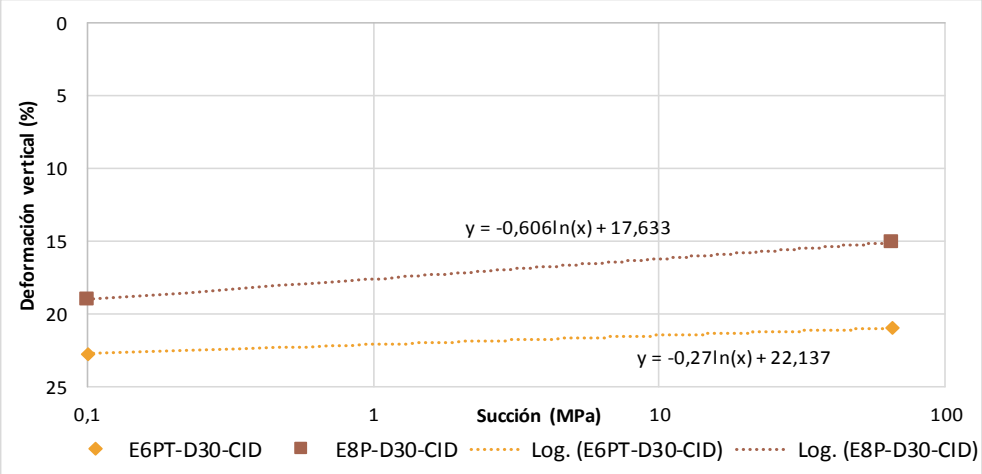


Figura 0-3: Curvas succión-deformación vertical durante el colapso para los ensayos en pizarras con recubrimiento hidrófobo.

DEFORMACIÓN DEPENDIENTE DEL TIEMPO. CURVAS TIEMPO - DEFORMACIÓN.

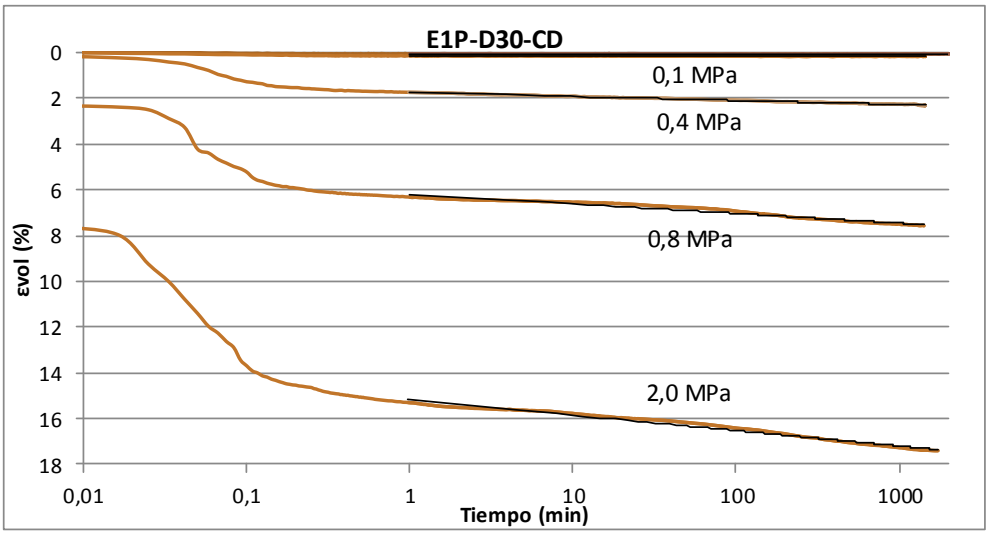


Figura 0-4: Curvas tiempo-deformación. E1P-D30-CD.

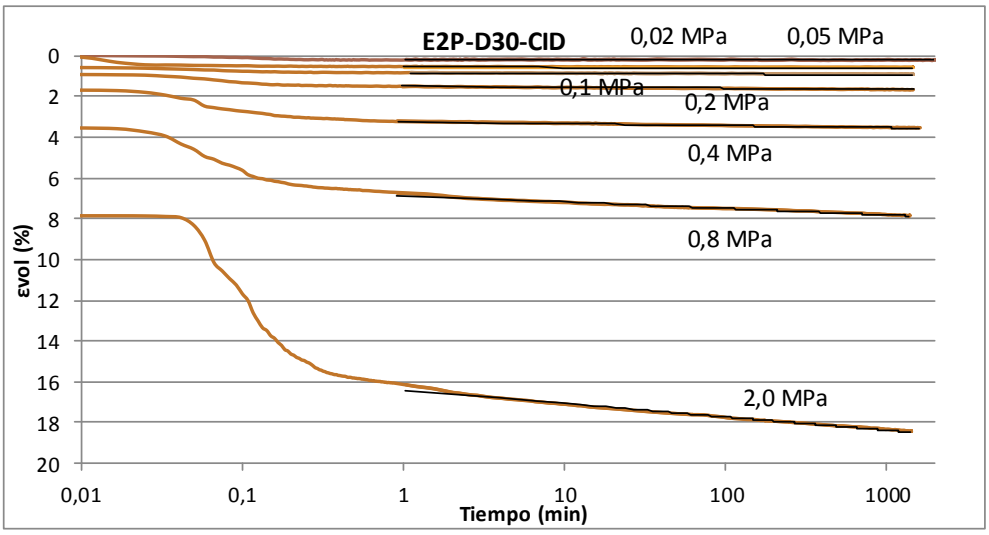


Figura 0-5: Curvas tiempo-deformación. E2P-D30-CID.

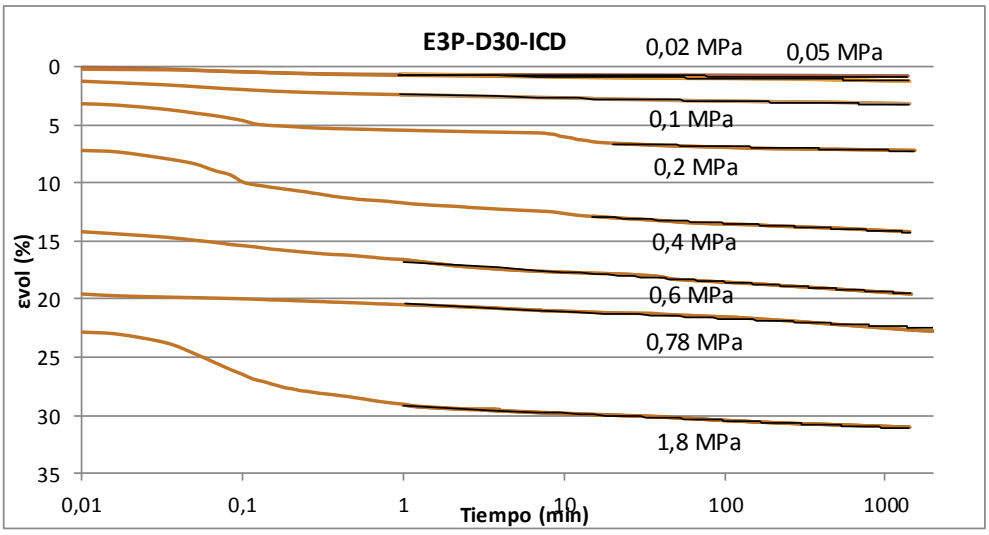


Figura 0-6: Curvas tiempo-deformación. E3P-D30-ICD.

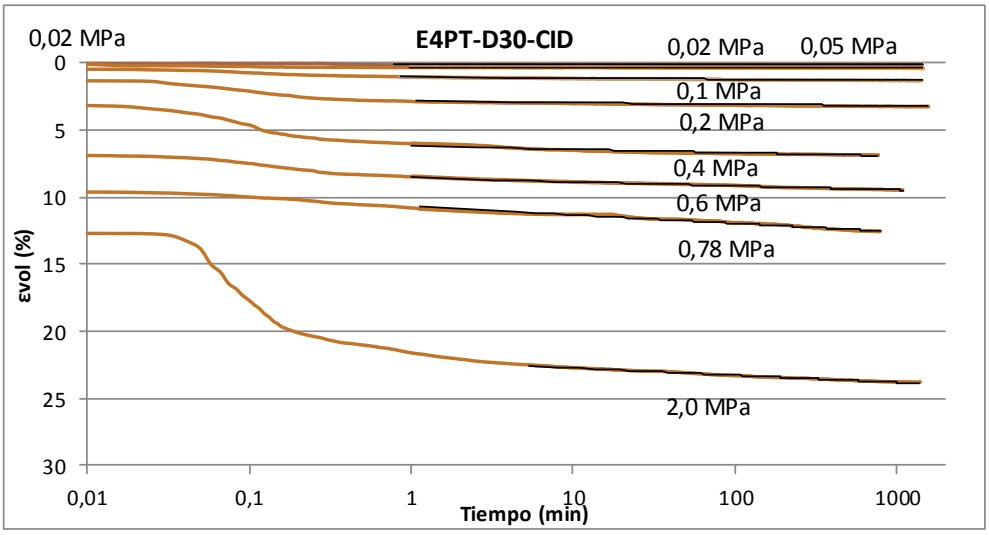


Figura 0-7: Curvas tiempo-deformación. E4PT-D30-CID.

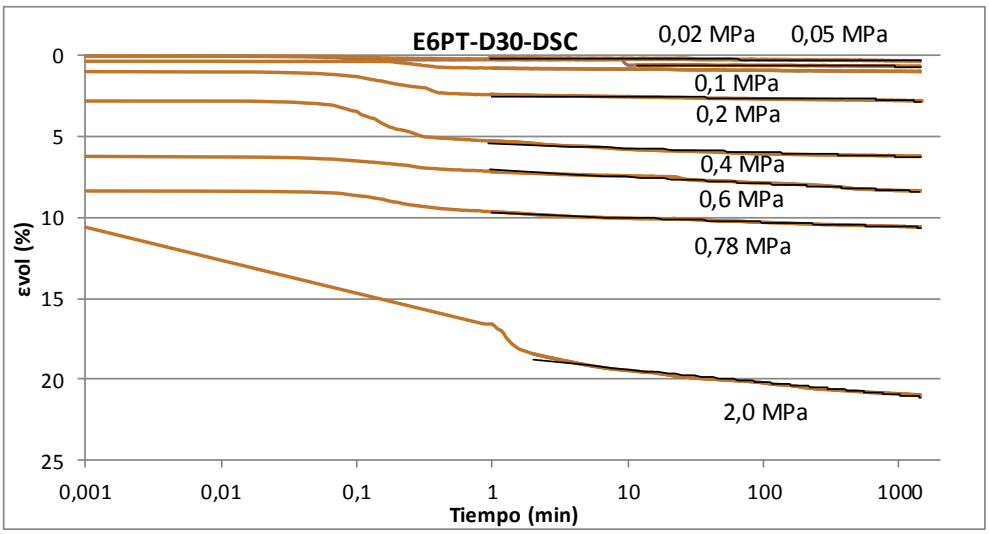


Figura 0-8: Curvas tiempo-deformación. E6PT-D30-CSD.

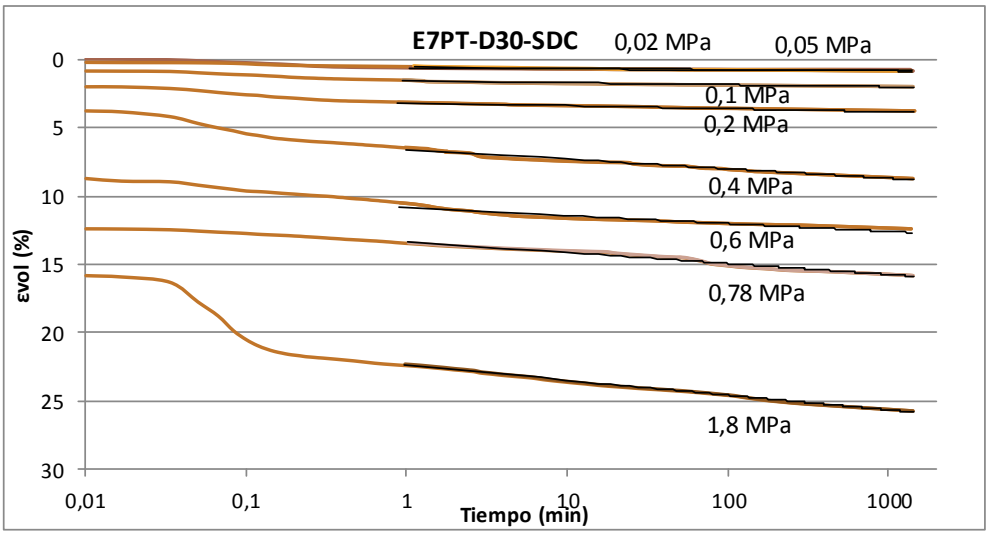


Figura 0-9: Curvas tiempo-deformación. E7P-D30-SCD.

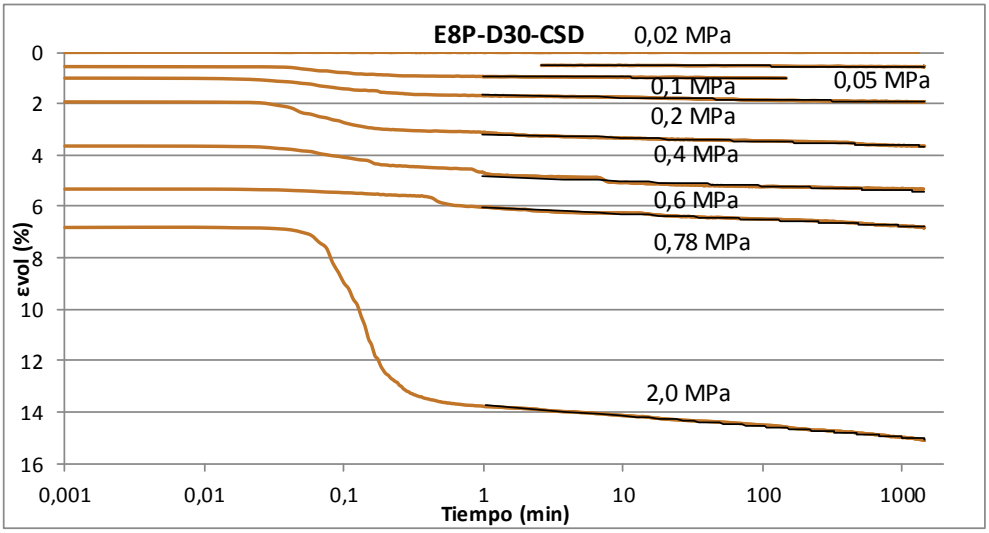


Figura 0-10: Curvas tiempo-deformación. E8P-D30-CSD.

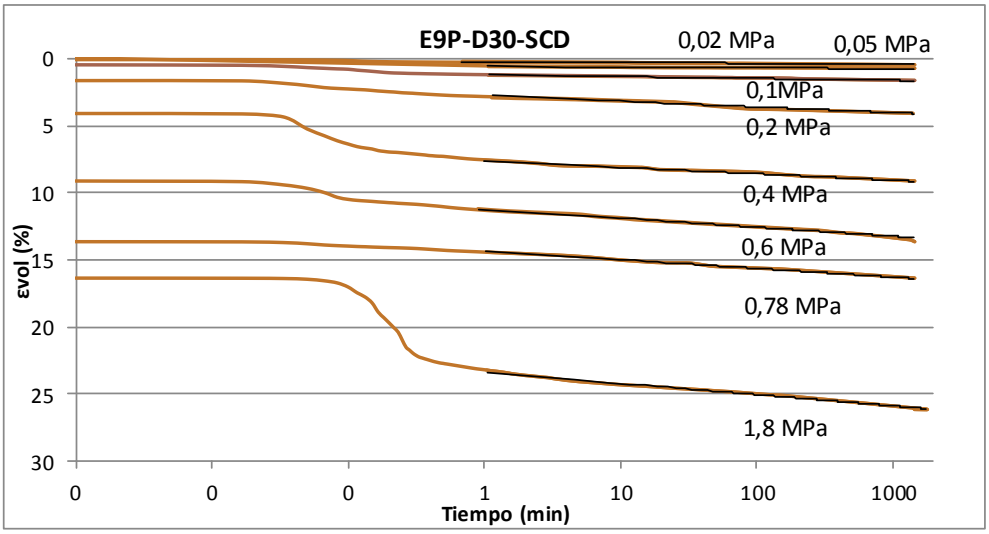


Figura 0-11: Curvas tiempo-deformación. E9P-D30-SCD.

ANEJO II: REPORTAJE FOTOGRÁFICO

TRATAMIENTO HIDRÓFOBO



Figura 0-1 : Material necesario para realizar el tratamiento hidrófobo



Figura 0-2 : Desecadores con las muestras tras el tratamiento.



Figura 0-3 : Muestra tratada secandose al aire.



Figura 0-4 : Muestras provinientes de distintas tongadas de tratamientos.



Figura 0-5 : Apariencia impercibible del tratamiento.

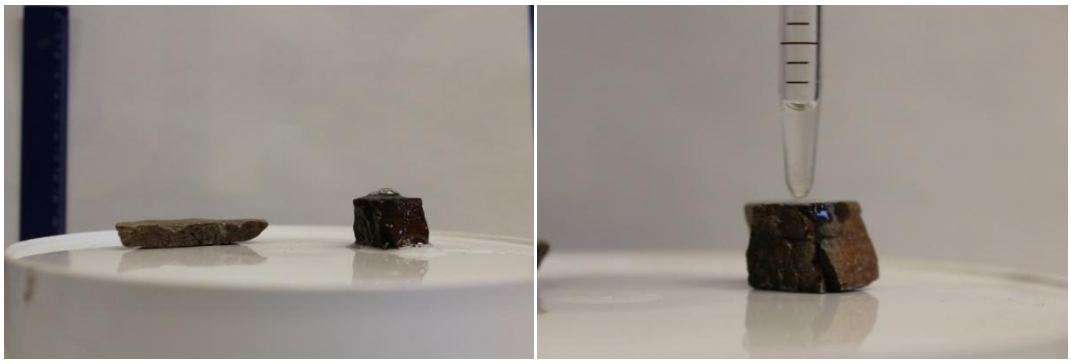


Figura 0-6 : Partículas sin tratar.

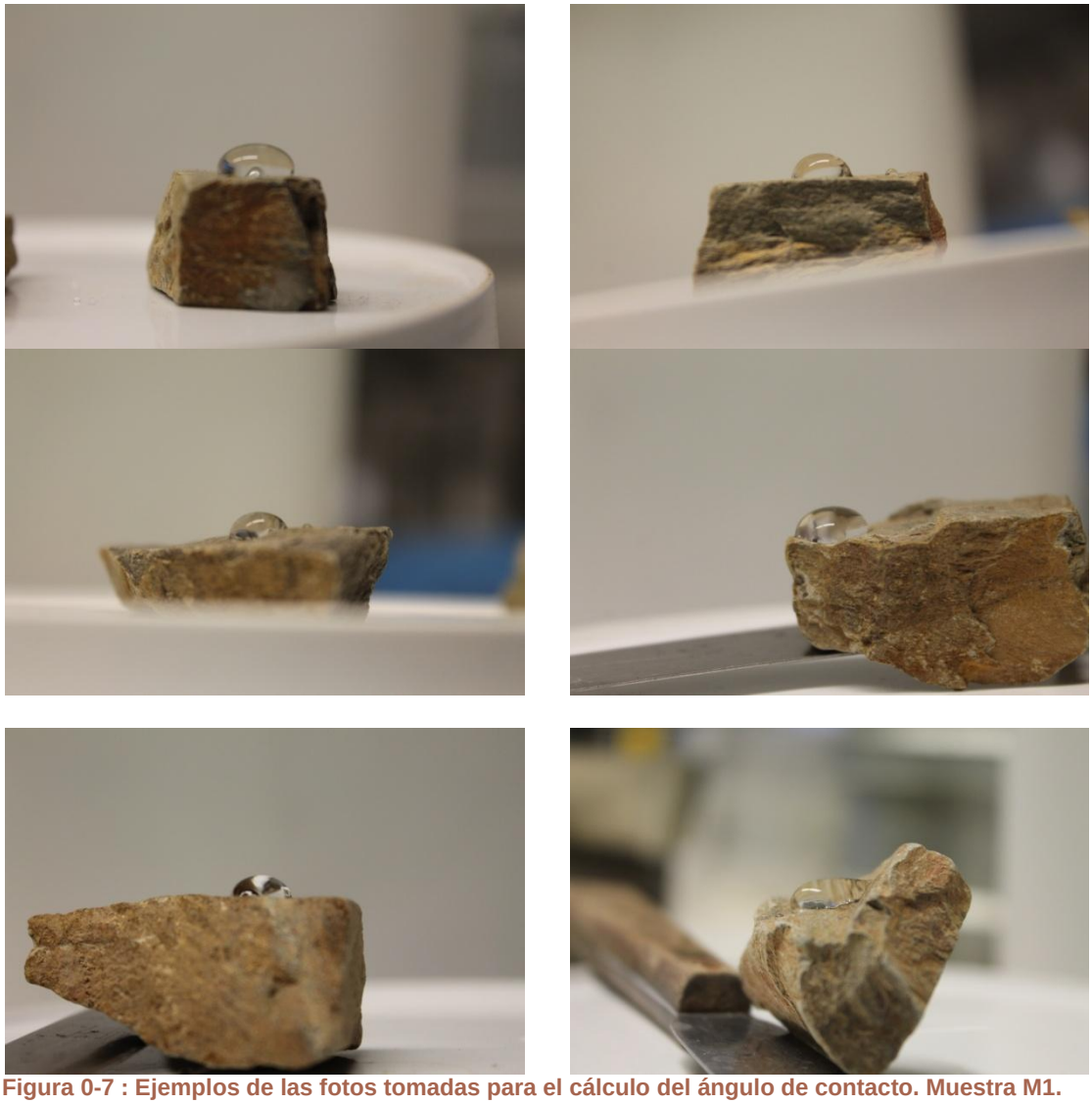


Figura 0-7 : Ejemplos de las fotos tomadas para el cálculo del ángulo de contacto. Muestra M1.



Figura 0-8 : Ejemplos de las fotos tomadas para el cálculo del ángulo de contacto. Muestra M2.





Figura 0-9 : Ejemplos de las fotos tomadas para el cálculo del ángulo de contacto. Muestra M3.



Figura 0-10 : Ejemplos de las fotos tomadas para el cálculo del ángulo de contacto. Muestra M4.



Figura 0-11: Ejemplos de las fotos tomadas para el cálculo del ángulo de contacto. Muestra M5.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL DE UNA PARTÍCULA IRREGULAR DE ROCA ENTRE DOS PLACAS DE ACERO

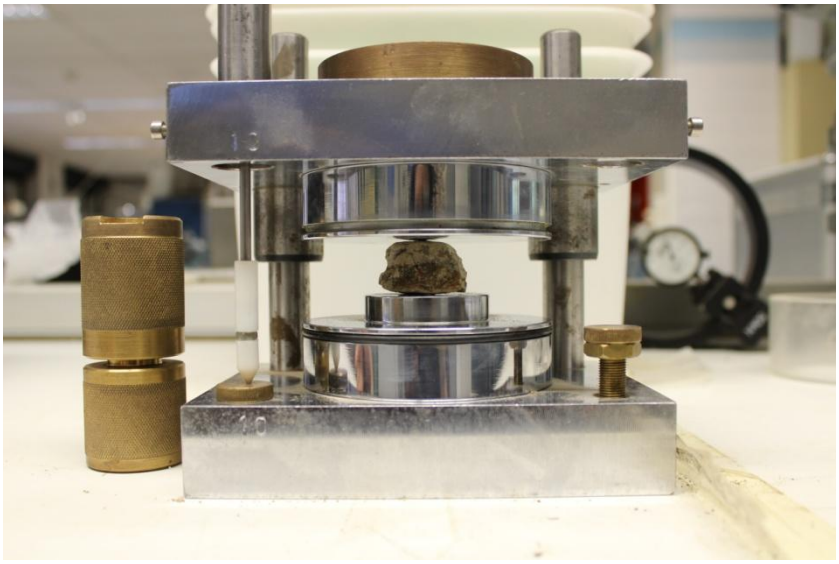


Figura 0-12 : Equipo utilizado.



Figura 0-13 : Montaje del equipo en la prensa.



Figura 0-14 : Partículas tratadas y naturales tras el ensayo en condiciones secas.

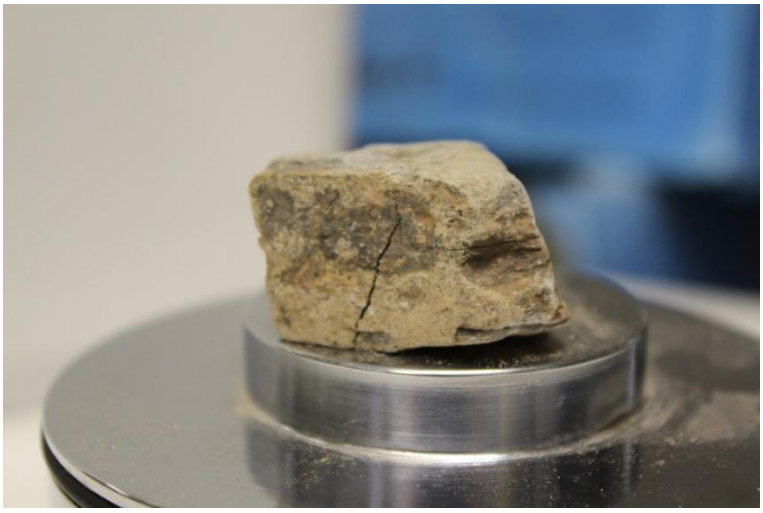


Figura 0-15 : Ejemplo de rotura diametral producida con el ensayo.

ENSAYOS EDOMÉTRICOS



Figura 0-16 : Edómetro desmontado.

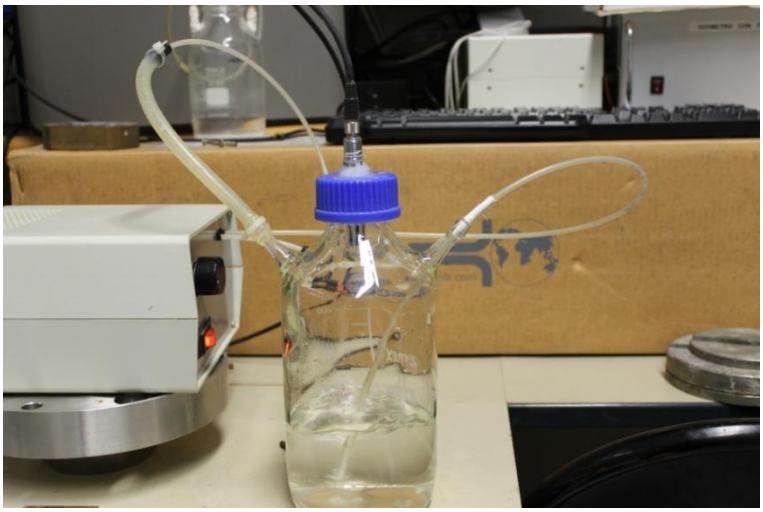


Figura 0-17 : Sistema para la saturación con vapor de agua.

E2P-D15-ICD



Figura 0-18 : Muestra después del ensayo.



Figura 0-19 : Comparación de la granulometría final e inicial.

E1P-D30-CD



Figura 0-20 : Muestra después del ensayo.

E2P-D30-CID



Figura 0-21 : Muestra antes del ensayo.



Figura 0-22 : Muestra después del ensayo.

E3P-D30-ICD



Figura 0-23 : Muestra antes del ensayo.



Figura 0-24 : Comparación de la granulometría final e inicial.

E4PT-D30-CID



Figura 0-25 : Muestra antes del ensayo.



Figura 0-26 : Muestra después del ensayo.

E5PT-D30-ICD



Figura 0-27:Muestra antes del ensayo.



Figura 0-28: Muestra después del ensayo.

E6PT-D30-CSD



Figura 0-29: Muestra antes del ensayo.



Figura 0-30: Muestra después del ensayo.

E7PT-D30-SCD



Figura 0-31: Muestra antes del ensayo.



Figura 0-32: Muestra después del ensayo.

E8P-D30-CSD



Figura 0-33: Muestra antes del ensayo.

E9P-D30-SCD



Figura 0-34: Muestra antes del ensayo.