



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

COMPORTAMIENTO RESISTENTE AL DESLIZAMIENTO
DE GEOSINTÉTICOS

Autora

ANA BELÉN MARTÍNEZ BACAS

Directores

JORGE CAÑIZAL BERINI

HEINZ KONIETZKY

Santander, 2009

Esta tesis doctoral ha sido financiada por las siguientes empresas e instituciones:

- Proyecto de investigación “Estudio de las características friccionales de los geosintéticos empleados en vertederos”, Financiado por la empresa CESPA del GRUPO FERROVIAL.
- Este proyecto obtuvo una subvención PROFIT 2006. FIT-310200-2006-57 del MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO, en el Programa Nacional de Ciencias y Tecnología Medioambientales dentro del Subprograma Nacional de Tecnologías para la Gestión Sostenible Medioambiental
- Universidad de Freiberg (Bergakademie Freiberg, Alemania), Departamento de Mecánica de Rocas (Gebirgs-und Felsmechanik/Felsbau).
- Beca de Investigación Doctoral del Gobierno alemán, Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD) (convocatoria año 2008)



Deutscher Akademischer Austausch Dienst
German Academic Exchange Service



Agradecimientos/Dank

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Prof. Jorge Cañizal, director de esta tesis, por todo su conocimiento y experiencia compartida, así como su esfuerzo y tiempo aportados. Agradecerle también la oportunidad que me ha dado de abrir la ventana a la investigación, que espero que siga siendo parte de mi actividad profesional en el futuro.

Meinen allerherzlichsten Dank gilt Herrn Professor Konietzky, dem Direktor der Thesis, der es mir ermöglichte einen Teil der Forschungsarbeit am Institut für Felsmechanik an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg auszuführen. Sein umfangreiches Wissen und seine Erfahrung waren der Schlüssel für die Entwicklung dieser Arbeit. Vielen Dank Professor für die Zeit, die Sie mir gewidmet haben, für die Besprechungen und Diskussionen, die wir unterhielten und deren Ergebnis das vierte Kapitel, der vorliegenden Thesis ist, auf die ich sehr stolz bin.

Del mismo modo, deseo transmitir mi agradecimiento al Prof. César Sagaseta, por la ayuda que me ha prestado, por lo que me ha enseñado, así como por sus consejos y recomendaciones.

También agradecer a la Prof. ^a Almudena Da Costa toda la ayuda y enseñanza prestada, además de su apoyo y comprensión.

Igualmente quiero expresar mi gratitud a la empresa CESPAs del Grupo Ferrovial, que me han sufragado económicamente, otorgándome una beca de investigación a través de la Universidad de Cantabria. Agradeciendo especialmente a Mónica Fernández, del Departamento I+D+i, y Ángel Martínez, del Departamento de Depósitos Controlados, por todo el apoyo logístico, conocimientos técnicos y ayuda recibido.

Agradecimiento especial al personal del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, Javier de la Fuente y Fernando del Puerto, porque sin su ayuda y dedicación difícilmente se podría haber llevado a cabo el trabajo experimental de esta investigación.

Quiero extender mi agradecimiento al resto del Grupo de Geotecnia, a mis compañeros de doctorado Ana Cimentada, Jorge Castro, José Miguel Montenegro y Falko Schmidt, con los que me une la amistad, y los buenos y malos momentos que hemos compartido durante la realización de nuestras tesis. Y a la secretaria, Beatriz Alciturri por el ánimo dado en todo momento.

Ich möchte meinen Dank den Doktoranden und den Mitarbeitern im Labor und Sekretariat des Geotechnik Instituts der Technischen Universität Bergakademie Freiberg für ihre Unterstützung und Freundschaft aussprechen. Vielen Dank; Ich fühlte mich bei Euch wie zu Hause.

Índice de contenidos

Lista de Figuras	13
Lista de Tablas	21
Notación	23
Resumen	25
Abstract	27
Thesis summary	29
Presentación del documento	47
Introducción	49
1 Estado del conocimiento	57
1.1 Sección básica de un vertedero	57
1.2 Tipos de geosintéticos	59
1.3 Sistemas de protección de vertederos: vaso y sellado	61
1.4 Estudio de la estabilidad de vertederos de residuos sólidos urbanos	64
1.5 Obtención de los parámetros resistentes al corte de los residuos	71
1.6 Obtención de los parámetros resistentes al corte de las interfaces entre geosintéticos y entre suelo y geosintético	73
1.7 Modelos de comportamiento de las discontinuidades	83
1.8 Consideraciones finales	95
2 Metodología del ensayo de corte directo para las interfaces geosintético/geosintético y suelo/geosintético	97
2.1 Introducción	97
2.2 Limitaciones y problemas encontrados en la aplicación de los métodos de sujeción de geosintéticos preexistentes	98
2.3 Descripción y uso del nuevo sistema de sujeción de geosintéticos	101
2.3.1 Características	101
2.3.2 Desarrollo	101
2.3.3 Utilización	104

2.4	Sistemas de sujeción adoptados para los diversos geosintéticos	104
2.5	Metodología desarrollada para la realización del ensayo	105
2.5.1	Guía de ensayo	105
2.5.2	Compactación del suelo	106
2.5.3	Esquema de ensayo para las diferentes interfaces	107
2.5.4	Condiciones de humedad del ensayo	109
2.6	Interpretación del ensayo	110
2.6.1	Ajuste mediante el modelo de Coulomb	112
2.6.2	Otros posibles modelos de ajuste	113
3	Análisis de resultados de los ensayos de corte directo de las interfaces	115
3.1	Consideraciones generales	115
3.2	Materiales utilizados en el programa de ensayos de laboratorio	117
3.3	Interfaz geomembrana/geotextil	121
3.3.1	Comportamiento resistente al corte de la interfaz	122
3.3.2	Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz	126
3.3.3	Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz	127
3.3.4	Influencia del tipo de geotextil en la resistencia al corte de la interfaz	134
3.3.5	Comparación de los resultados obtenidos con otros autores	141
3.4	Interfaz geomembrana/geocompuesto drenante	147
3.4.1	Comportamiento resistente al corte de la interfaz	147
3.4.2	Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz	151
3.4.3	Influencia de la masa por unidad de área del geotextil en contacto con la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz	156
3.4.4	Influencia de la geored en la resistencia al corte de la interfaz	157
3.5	Interfaz geomembrana/suelo	158
3.5.1	Comportamiento resistente al corte de la interfaz	159
3.5.2	Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz	162

3.6	Interfaz geotextil/suelo	164
3.6.1	Comportamiento resistente al corte de la interfaz	165
3.6.2	Influencia del tipo de suelo en la resistencia al corte de la interfaz	166
3.6.3	Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz	167
3.6.4	Influencia del tipo de geotextil en la resistencia al corte de la interfaz	169
3.7	Interfaz geomembrana/Geosynthetic Clay Liner	170
3.7.1	Comportamiento resistente al corte de la interfaz	170
3.7.2	Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz	175
3.7.3	Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz	175
3.8	Interfaz geocompuesto drenante/Geosynthetic Clay Liner	177
3.8.1	Comportamiento resistente de la interfaz	178
3.8.2	Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz	180
3.8.3	Influencia del tipo de geocompuesto drenantes en la resistencia al corte de la interfaz	182
3.9	Geosynthetic Clay Liner	183
3.9.1	Comportamiento resistente al corte de la GCL	183
3.10	Interfaz suelo/geomalla/geocompuesto drenante	186
3.10.1	Comportamiento resistente al corte de la interfaz	187
3.10.2	Influencia del tipo de geomalla en la resistencia al corte de la interfaz	190
4	Model and numerical analysis of the direct shear test of geomembrane/geotextile interface	193
4.1	Shear strength model	193
4.1.1	Theory	193
4.1.2	Modelling material	200
4.1.3	Residual friction angle (ϕ_r)	201
4.1.4	Geotextile reference compression stress (GCS)	203
4.1.5	Hook and Loop (HL)	207
4.1.6	Interbedding (I)	209

4.1.7	Peak displacement (δ_{peak})	214
4.1.8	Mobilization of hook and loop during shear	216
4.1.9	Normal stiffness (kn) and shear stiffness (ks).	219
4.1.10	Comparison with measured data	220
4.2	Numerical analysis	226
4.2.1	Steps to perform the Geomembrane/geotextile direct shear model	226
4.2.2	Interpretation of results	236
4.2.3	How obtain the constants of the direct shear model?	238
4.2.4	Comparison with measured data	240
4.2.5	Different analysis of the direct shear numerical model changing the geometry, initial and boundary conditions	242
	Conclusiones y trabajo futuro	247
	Conclusions and future research	257
	Referencias	265
	Apéndice A. Metodología y máquina de corte directo	273
	Apéndice B. Resultados de ensayos de laboratorio	297
	Apéndice C. Summary of parameters	451
	Apéndice D. Spreadsheet of the shear strength model	459
	Apéndice E. Summary of shear strength model results	461
	Apéndice F. Data file for direct shear test	469

Lista de figuras

Figura 1.1	Sección transversal de un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU)	58
Figura 1.2	Vista aérea del vertedero de Meruelo (Cantabria)	58
Figura 1.3	Tipos de geosintéticos	60
Figura 1.4	Secciones sistema impermeabilización y sellado de un vertedero de RSU	63
Figura 1.5	Colocación de láminas de GCL en la base de un vertedero	63
Figura 1.6	Colocación de geomembranas y geotextiles en la base de un vertedero	64
Figura 1.7	Rotura a través de la masa de residuo	66
Figura 1.8	Deslizamiento a través de las láminas de impermeabilización	67
Figura 1.9	Inestabilidad a través del residuo	68
Figura 1.10	Inestabilidad en sistemas de impermeabilización y sellado	69
Figura 1.11	Inestabilidad dentro del sistema de impermeabilización	69
Figura 1.12	Parámetros recomendados para residuos. Sánchez et al. (1993)	73
Figura 1.13	Esquema del ensayo de corte directo	74
Figura 1.14	Pullout test, Fox et al. (1997)	75
Figura 1.15	Esquema aparato de corte "Pullout box". Mitchell et al. (1990)	75
Figura 1.16	Esquema del ensayo de plano inclinado. UNE-EN ISO 12957-2	76
Figura 1.17	Esquema del ensayo de corte anular	77
Figura 1.18	Envoltentes y mecanismos de rotura muestras con superficies irregulares. Modelo de Patton (1966)	84
Figura 1.19	Criterio de Barton (1973) para planos de discontinuidad en rocas	86
Figura 1.20	Primera clasificación y predicción de la resistencia al corte de tres tipos de juntas rugosas (Barton, 1973)	87
Figura 1.21	Idealización de una superficie de discontinuidad (Plesha, 1987)	88
Figura 1.22	Gráfica $\log \sigma_n$ vs ΔV_j para diferentes tipos de juntas (Bandis et al., 1983)	90
Figura 1.23	Compresión de una junta, σ_i es la tensión inicial de la junta	90
Figura 1.24	Gráficas lineales de $\Delta V_j / \sigma_n$ vs ΔV_j , junta de caliza, (Bandis et al., 1983)	91

Figura 1.25 Variación de la rigidez a cortante de pico con la tensión normal de diferentes tipos de juntas (Bandis et al., 1983)	93
Figura 1.26 Curva idealizada tensión tangencial-desplazamiento. Amadei et al. (1998)	93
Figura 1.27 Comparación entre los resultados de experimentos de laboratorio y el modelo constitutivo propuesto, Grasselli y Egger (2003)	94
Figura 2.1 Aparato de corte directo utilizado	98
Figura 2.2 Esquema del ensayo de corte directo (ASTM D5321-02)	99
Figura 2.3 Método de sujeción con papel de lija. Aspecto después del ensayo	100
Figura 2.4 Método de sujeción “ <i>truss plates</i> ”	100
Figura 2.5 Descripción de la placa dentada	102
Figura 2.6 Placa metálica dentada	103
Figura 2.7 Descripción del soporte metálico	103
Figura 2.8 Piezas del soporte metálico	104
Figura 2.9 Esquema ensayo corte directo tipo 1	108
Figura 2.10 Esquema ensayo corte directo tipo 2	108
Figura 2.11 Esquema ensayo corte directo tipo 3	108
Figura 2.12 Esquema ensayo corte directo tipo 4	109
Figura 2.13 Esquema del ensayo y resultados obtenidos	111
Figura 2.14 Envolventes de rotura bilineales, interfaz geocompuesto/geomembrana	112
Figura 2.15 Envolventes de rotura curvas para una interfaz geotextil/geomembrana	114
Figura 3.1 Rugosidad de la geomembrana	117
Figura 3.2 Fotografías de varios métodos de fabricación de geotextiles	118
Figura 3.3 Esquema de la sección transversal de un geotextil agujeteado	119
Figura 3.4 Geocompuesto drenante	119
Figura 3.5 Esquema de la sección transversal de la GCL	120
Figura 3.6 Tipos de geomallas	120
Figura 3.7 Comportamiento resistente de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil	122
Figura 3.8 Envolvente rotura interfaz geomembrana/geotextil (GMr2_s1/GT1)	124

Figura 3.9 Esquema del mecanismo de interacción de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil para a) valores bajos de la tensión normal y b) valores altos de la tensión normal (después de Hebel et al., 2005)	125
Figura 3.10 Daños observados en los geotextiles: a) GT3 b) GT1	126
Figura 3.11 Comparación de las envolventes de rotura de ensayos realizados en condiciones húmedas y secas con la interfaz geomembrana/geotextil	127
Figura 3.12 Comparación envolventes de rotura con geomembrana lisa y rugosa	128
Figura 3.13 Las fotos 1 y 2 muestran respectivamente la planta y el alzado de la macrotextura. En la foto 3 se observa el alzado de la microtextura	129
Figura 3.14 Efecto del tamaño de la macrotextura en la resistencia al corte de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil	129
Figura 3.15 Efecto de la macrotextura > 1 mm en la forma de la curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal	131
Figura 3.16 Comportamiento resistente de la interfaz GMr1/GT1	131
Figura 3.17 Efecto de la densidad de macrotextura en la resistencia al corte de las interfaces geomembrana rugosa/geotextil	132
Figura 3.18 Imágenes tres tipos de geomembranas con tamaño rugosidad <1 mm	133
Figura 3.19 Envolventes rotura interfaz geomembrana rugosa/geotextil (GT1)	133
Figura 3.20 Variación del coeficiente de rozamiento con el tamaño de la rugosidad para el geotextil GT1	134
Figura 3.21 Comparación de envolventes de rotura geomembrana lisa/geotextil	135
Figura 3.22 Efecto de la longitud de fibra del geotextil	136
Figura 3.23 Sensibilidad del geotextil agujeteado de fibra larga (GT1)	137
Figura 3.24 Sensibilidad del geotextil agujeteado de fibra corta (GT2)	138
Figura 3.25 Variación de la sensibilidad con el tamaño de la macrorugosidad (geotextiles agujeteados)	138
Figura 3.26 Sensibilidad del geotextil termosoldado (GT3)	139
Figura 3.27 Variación de la sensibilidad con el tamaño de la macrorugosidad, geotextil agujeteado (GT1) y termosoldado (GT3)	140
Figura 3.28 Efecto del método de fabricación del geotextil	140
Figura 3.29 Envolventes de rotura de las interfaces geomembrana/geotextil(GT3)	141
Figura 3.30 Comparación entre tensiones tangenciales de pico. Tamaño de muestra grande. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa	143

Figura 3.31 Comparación entre tensiones tangenciales post-pico. Tamaño de muestras grande. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa	144
Figura 3.32 Comparación de tensiones tangenciales pico. Tamaño de muestras pequeño. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa	145
Figura 3.33 Comparación de tensiones tangenciales post-pico. Tamaño de muestras pequeño. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa	146
Figura 3.34 Comportamiento resistente de la interfaz geomembrana/geocompuesto	149
Figura 3.35 Mecanismos de interacción de la interfaz geomembrana rugosa/geocompuesto drenante.	150
Figura 3.36 Comparación envolventes de rotura geomembrana lisa y rugosa	151
Figura 3.37 Envolventes de rotura de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC1)	153
Figura 3.38 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC1)	153
Figura 3.39 Envolventes de rotura de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC2)	154
Figura 3.40 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC2)	154
Figura 3.41 Daños que se producen en las muestras ensayadas al corte	155
Figura 3.42 Envolventes de pico para diferente masa por unidad de área del geotextil	156
Figura 3.43 Envolventes post-pico, diferente masa por unidad de área de geotextil	157
Figura 3.44 Envolventes de rotura. GMr2_s1/GC1 y GMr2_s1/geotextil	158
Figura 3.45 Comportamiento resistente de la interfaz geomembrana/suelo1	159
Figura 3.46 Daños producidos en la geomembrana lisa después del corte	160
Figura 3.47 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/suelo1	160
Figura 3.48 Interacción suelo1-geomembrana (rugosidad mayor de 1 mm)	161
Figura 3.49 Interacción suelo1-geomembrana (rugosidad menor de 1 mm)	162
Figura 3.50 Envolventes de rotura de las interfaces geomembrana lisa/suelo1 y geomembrana rugosa/suelo1	163
Figura 3.51 Envolventes de rotura de las interfaces geomembrana/suelo1 y de resistencia interna del suelo1	164
Figura 3.52 Comportamiento de la interfaz geotextil/suelo en condiciones secas	166
Figura 3.53 Sensibilidad de la interfaz geotextil/suelo	166
Figura 3.54 Envolventes de rotura geotextil/suelo(1 y 2)	167
Figura 3.55 Envolventes de la interfaz GT4/suelo1. Condiciones húmedas y secas	168

Figura 3.56 Envoltentes de la interfaz GT5/suelo1. Condiciones húmedas y secas	168
Figura 3.57 Muestras después del ensayo de corte directo. Foto a) en condiciones secas. Foto b) en condiciones húmedas	168
Figura 3.58 Envoltentes rotura para dos tipos de geotextil e interna del suelo.	169
Figura 3.59 Comportamiento al corte de la interfaz GMr3/GCL. Condiciones secas	171
Figura 3.60 Huellas en la superficie de la GCL	172
Figura 3.61 Mecanismo interacción geomembrana/GCL	172
Figura 3.62 Muestra de GCL ensayada: a) ensayo en condiciones secas b) ensayo en condiciones húmedas	173
Figura 3.63 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/GCL	173
Figura 3.64 Comportamiento de la interfaz GMr3/GCL. Condiciones húmedas	174
Figura 3.65 Envoltentes de rotura de la interfaz GMr3/GCL	175
Figura 3.66 Envoltentes de rotura geomembrana/GCL y GCL sola: (a) en condiciones secas y (b) húmedas	176
Figura 3.67 Efecto del tipo de rugosidad. Interfaz geomembrana/GCL	177
Figura 3.68 Comportamiento de la interfaz geocompuesto(GC3)/GCL en condiciones secas	178
Figura 3.69 Sensibilidad de la interfaz geocompuesto/GCL	179
Figura 3.70 Condiciones húmedas. Interfaz geocompuesto(GC3)/GCL	180
Figura 3.71 Envoltentes de rotura. Interfaz geocompuesto (GC3)/GCL	181
Figura 3.72 Plano de deslizamiento en condiciones secas	181
Figura 3.73 Plano de deslizamiento en condiciones húmedas	182
Figura 3.74 Efecto del tipo de geocompuesto drenante. Interfaz geocompuesto/GCL	183
Figura 3.75 Comportamiento resistente de la GCL en condiciones secas	184
Figura 3.76 Muestra de GCL después de ser ensayada en condiciones secas	184
Figura 3.77 Comportamiento resistente de la GCL en condiciones húmedas	185
Figura 3.78 Muestra de GCL después de ser ensayada en condiciones húmedas	186
Figura 3.79 Envoltentes de rotura de la GCL en condiciones secas y húmedas	186
Figura 3.80 Comportamiento de la interfaz suelo/geomalla/geocompuesto drenante	187
Figura 3.81 Muestras del ensayo suelo/geomalla/geocompuesto después de ser ensayadas: a) geomalla1, b)geomalla2	188
Figura 3.82 Mecanismos de interacción suelo/geomalla/geocompuesto. Sección perpendicular a la dirección de desplazamiento de corte	189

Figura 3.83 Interacción suelo-geomalla. Sección paralela a la dirección de desplazamiento de corte.	190
Figura 3.84 Envoltentes de rotura interfaz suelo/geomalla/geocompuesto drenante	191
Figura 3.85 Dilatancia interfaz suelo/geomalla/geocompuesto	192
Figure 4.1 (a) Non-planar rock joint (Barton, 1973). (b) NWNP geotextile/textured geomembrane interface (Hebeler et al., 2005)	193
Figure 4.2 (a) Examples of the range of joint roughnesses (Barton and Choubey, 1977). (b) Surfaces roughness of the geosynthetics	194
Figure 4.3 (a) Shear stress-displacement data obtained from replicas of rock joints (Barton et al., 1985). (b) Shear stress-displacement data obtained from texture geomembrane/geotextile interface.	194
Figure 4.4 Two methods for presenting the results of direct shear test on rock joints. (Barton, 1973)	196
Figure 4.5 Sketch of interaction mechanisms between needle-punched non-woven geotextiles and textured geomembranes at different normal stresses: (a) low normal stress and (b) high normal stress. (Hebeler et al., 2005)	197
Figure 4.6 Geotextile/rough geomembrane interface shear strength: (a) results of direct shear box texts (\blacktriangle) and inclined board test, point B (\bullet); and (b) close-up on the vicinity of the origin of the axes. (The curve was conservatively drawn as if it would meet the straight line for $\sigma=50$ kPa) (Griroud et al., 1990)	198
Figure 4.7 Two methods for presenting the results of direct shear tests on geomembrane/geotextile interface	200
Figure 4.8 Test to obtain the compressibility of the geotextiles	203
Figure 4.9 Compressibility of GT_nwnp_mf	204
Figure 4.10 Compressibility of GT_nwnp_st	205
Figure 4.11 Compressibility of GT_nwhb_mf	206
Figure 4.12 Images of texture geomembranes used in the test program.	208
Figure 4.13 R vs. normal stress geomembranes macrotecture >1 mm and < 1 mm	208
Figure 4.14 Interbedding for the geotextile non-woven needle punched made with monofilaments	209
Figure 4.15 Interbedding geotextile non-woven needle punched made staple fibers	210
Figure 4.16 Interbedding geotextile non-woven heat bonded made monofilaments	210

Figure 4.17 Interbedding vs. normal stress for the geotextile non-woven needle punched made with monofilaments	211
Figure 4.18 Interbedding vs. normal stress for the geotextile non-woven needle punched made with staple fibers	211
Figure 4.19 Interbedding vs. normal stress for the geotextile non-woven heat bonded made with monofilaments	212
Figure 4.20 Interbedding vs. normal stress	213
Figure 4.21 Images (SEM) of geotextiles used in the test program. (a) GT_nwnp_mf (b) GT_nwnp_st (c) GT_nwhb_mf	213
Figure 4.22 Peak displacement vs. normal stress	215
Figure 4.23 $HL*I$ vs. normal stress	216
Figure 4.24 Dimensionless model of shear behaviour of texture geomembrane/geotextile	218
Figure 4.25 Linear plots of $\Delta V_j/\sigma_n$ vs ΔV_j for different interfaces types	220
Figure 4.26 Comparison of shear stress-displacement data obtained from shear strength models and direct shear tests	222
Figure 4.27 Comparison of peak and post-peak shear strength models with direct shear tests results of rough geomembrane/nonwoven geotextile interfaces. The post-peak shear stress value is for a horizontal displacement of 50 mm	223
Figure 4.28 Family of peak strength envelopes for rough geomembranes/nonwoven geotextiles obtained having the given HL , I , GCS and $\Phi_{residual}$ values	224
Figure 4.29 Supposed trend of the peak failure envelopes from high normal stress	225
Figure 4.30 Sketch large direct shear test of the geosynthetic/geosynthetic interface	227
Figure 4.31 General solution procedure using FLAC ^{3D} (ITASCA 2007)	228
Figure 4.32 Brick-type mesh for direct shear test model	229
Figure 4.33 Zoomed front view brick-type mesh for direct shear test model	230
Figure 4.34 Interface between two sub-grids	230
Figure 4.35 Front view with interface between two sub-grids	231
Figure 4.36 Fixed displacements in y and z -directions at the upper face of the top sub-grid during shear phase	232

Figure 4.37 Fixed displacements in x , y and z -directions at the lower face of the bottom sub-grid during shear phase	233
Figure 4.38 Normal stress (Pa) contours in the direct shear model	233
Figure 4.39 Normal stress (Pa) in the interface	234
Figure 4.40 Direct shear test model	235
Figure 4.41 Shear stress versus shear displacement	235
Figure 4.42 Maximum unbalance force (F_n) during normal stress application	236
Figure 4.43 Velocity (m/calculation step) vectors in shear model	237
Figure 4.44 Interface shear stress (Pa)	238
Figure 4.45 Interface normal stress at the end of the test (Pa)	238
Figure 4.46 Poisson's ratio for different materials	240
Figure 4.47 Comparison of shear stress-displacement data obtained from numerical models and direct shear tests	241
Figure 4.48 Normal stress (Pa) application in the " <i>large model</i> "	242
Figure 4.49 Interface normal (Pa) stress from " <i>large model</i> "	243
Figure 4.50 Direct shear test from " <i>large model</i> "	243
Figure 4.51 Interface shear stress (Pa) from " <i>large model</i> "	244
Figure 4.52 Normal stress (Pa) application from model with uniform settlement	245
Figure 4.53 Interface normal stress (Pa) from model with uniform settlement	245
Figure 4.54 Interface shear stress (Pa) from model with uniform settlement	246
Figure 4.55 Comparison of shear stress-displacement data obtained from numerical models, shear strength model and direct shear test	246

Lista de tablas

Tabla 2.1 Condiciones de ensayo	110
Tabla 3.1 Tipos de geomembranas ensayadas	118
Tabla 3.2 Características de los geotextiles ensayados	119
Tabla 3.3 Características de los geocompuestos drenantes ensayados	119
Tabla 3.4 Características de la GCL ensayada	120
Tabla 3.5 Características de las geomallas ensayadas	121
Tabla 3.6 Ensayos interfaz geomembrana/geotextil	122
Tabla 3.7 Ensayos interfaz geomembrana/geocompuesto	147
Tabla 3.8 Ensayos interfaz geomembrana/suelo	159
Tabla 3.9 Ensayos interfaz geotextil/suelo	165
Tabla 3.10 Ensayos geomembrana/GCL	170
Tabla 3.11 Ensayos geocompuesto drenante/GCL	177
Tabla 3.12 Ensayos GCL sola	183
Tabla 3.13 Ensayos interfaz suelo/geomalla/geocompuesto	186
Table 4.1 Summary of geotextiles properties	200
Table 4.2 Summary of geomembranes properties	201
Table 4.3 Residual friction angles of texture geomembrane/geotextile interfaces	202
Table 4.4 Nominal thickness of the geotextiles	203
Table 4.5 Geotextile reference compression stress	207
Table 4.6 Dimensionless co-ordinates of the shear stress-displacement model	218

Notación

<i>a</i>	constante del desplazamiento horizontal de pico
<i>b</i>	constante del desplazamiento horizontal de pico
<i>c</i>	cohesión
<i>cc</i>	coeficiente de correlación
<i>c_a</i>	adhesión
<i>kn</i>	rigidez normal
<i>ks</i>	rigidez a cortante
<i>q</i>	constante de la rigidez normal
<i>r</i>	constante de la rigidez normal
<i>E</i>	Módulo de Young
<i>F_n</i>	Fuerza normal
<i>F_h</i>	Fuerza horizontal
<i>G</i>	Módulo de elasticidad transversal $G = E/2(1+\nu)$
GC1	geocompuesto tipo 1
GCL	Geosynthetic Clay Liner
GCLnw	Geosynthetic Clay Liner ensayada por el lado no tejido
GCS	Geotextile Compression Stress
GMr1	geomembrana rugosa tipo 1
GMr2_s1	geomembrana rugosa tipo 2 ensayada por la cara 1
GMI	geomembrana lisa
GT1	geotextil tipo 1
GT_nwnp_mf	geotextil no tejido agujeteado de fibra larga
GT_nwnp_st	geotextil no tejido agujeteado de fibra corta
GT_nwhb_mf	geotextil no tejido unido térmicamente de fibra larga
<i>HL</i>	coeficiente hook and loop
<i>I</i>	coeficiente interbedding
<i>JRC</i>	coeficiente de rugosidad
<i>JCS</i>	resistencia a compresión simple de las paredes de la junta
<i>K</i>	módulo volumétrico $K = E/3(1-2\nu)$

M	constante interbedding
N	constante interbedding
R	coeficiente de interacción interfaz geomembrana/geotextil
V_j	desplazamiento vertical
V_m	máximo cierre de la junta
δ	desplazamiento horizontal
δ_{peak}, δ_p	desplazamiento horizontal de pico
$\delta_{residual}, \delta_r$	desplazamiento horizontal residual
ϕ_p, ϕ_{peak}	ángulo de rozamiento de pico
ϕ_{pp}	ángulo de rozamiento post pico
$\phi_r, \phi_{residual}$	ángulo de rozamiento residual
ϕ_b	ángulo de rozamiento básico
ν	coeficiente de Poisson
σ_n, σ	tensión normal
σ_i	nivel inicial de tensión
τ	tensión tangencial, resistencia al deslizamiento o al corte.
$\tau_p, \tau_{pico}, \tau_{peak}$	tensión tangencial de pico
$\tau_{pp}, \tau_{post-pico}, \tau_{post-peak}$	tensión tangencial post-pico
$\tau_r, \tau_{residual}$	tensión tangencial residual

Resumen

El estudio de los parámetros resistentes de los geosintéticos utilizados en los sistemas de impermeabilización y sellado de vertederos de residuos sólidos urbanos es un tema muy importante. El depósito de residuos de manera segura y controlada requiere el diseño, construcción y llenado sobre sistemas de impermeabilización multicapa. Estos sistemas de impermeabilización típicamente contienen un gran número de interfaces (geosintético/geosintético y/o suelo/geosintético), muchos de los cuales tienen baja resistencia al deslizamiento. Esto potencia de existencia de superficies de rotura a lo largo de los taludes y base de los vertederos. La rotura del vertedero puede inducir la contaminación del agua subterránea, suelo y atmósfera.

El conocimiento de los parámetros resistentes al corte de los contactos entre geosintéticos (geotextiles, geomallas, geomembranas, etc.) y suelo es necesario para realizar un diseño seguro de vertedero. Este tema ha sido investigado en la Universidad de Cantabria durante los últimos cuatro años. Para ello se ha desarrollado una metodología del ensayo de corte directo 300x300 mm entre dos geosintéticos, entre suelo y geosintético, obteniendo los parámetros resistentes de estas interfaces. Se han ensayado un gran número de diferentes interfaces, mostrando algunas de ellas comportamientos particulares como la no linealidad de las envolventes de rotura, diferentes mecanismos de interacción y de rotura de los contactos. Estos comportamientos resistentes se han analizado para cada tipo de contacto ensayado.

Seguidamente, en la Universidad de Freiberg, se ha desarrollado el modelo de comportamiento resistente al corte de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil no tejido. Este modelo se ha implementado en el programa de diferencias finitas FLAC^{3D} para el desarrollo del modelo numérico. Comprobando que existe una excelente concordancia entre resultados de laboratorio, modelo analítico y modelo numérico.

La finalidad del modelo desarrollado es poder predecir y ajustar las curvas resistencia al corte-desplazamiento horizontal a partir de ensayos de laboratorio. Así como su integración en el diseño y cálculo de estabilidad de los vertederos.

Abstract

The study of friction of the geosynthetics used for municipal solid waste landfills both for basal-liner and capping systems is a very important issue. Safe disposal and storage of the waste requires the design, construction and filling of repositories underlain by multi-layer liner systems. These lining systems typically contain a large number of material interfaces (geosynthetics/geosynthetics or geosynthetics/soil), many of which have low shear strengths. This introduces potential failure surfaces along the side slopes and base of the fill mass. The failure of the landfill can induce contamination in the groundwater, soil and atmosphere.

The knowledge of shear strength parameters of contacts between geosynthetics (geotextiles, geogrids, and geomembranes) and soils is needed for safer design of landfills.

For last four years, a research project about this subject has been undertaken at University of Cantabria. In this research, a methodology for direct shear tests between two geosynthetics and a soil and a geosynthetic has been developed, achieving the friction parameters of these interfaces. A large number of tests for different types of contacts have been carried out. These interfaces show particular features, concerning non-linearity of failure envelope, different failure modes and interaction mechanisms. The shear strength behaviour has been researched for each type of contact.

Later on at Technical University Bergakademie Freiberg was developed a shear strength model of the textured geomembrane/nonwoven geotextile interface. On the one hand a shear model has been developed, on the other this model was introduced in numerical modelling code for advanced geotechnical analysis, FLAC^{3D}. There is an excellent agreement between laboratory results, shear model and numerical model.

The aim proposed model is predicting shear strength or extrapolating between fewer laboratory tests. Therefore, it sets up to design and calculate slope stability of the landfills.

Thesis summary

1. Introduction

Environment management of the world is important to guarantee the social and working capital over long term. One of most important aspects to manage is solid waste production. Safe disposal and storage of waste requires the design, construction and filling of repositories underlain by multi-layer liner systems. These lining systems typically contain a large number of material interfaces (geosynthetics/geosynthetics or geosynthetics/soil). Many of them have low shear strengths. This can lead to potential failure surfaces inside the slopes or the base of the landfills. Deeper understanding of the shear strength parameters and the constitutive relations of interacting geosynthetics is needed for safer design of landfills.

Figure 1 shows a sketch of a basic transversal section of a modern landfill, where the different types of geosynthetics and their functions are shown.

The main geosynthetics used for landfills are: geotextile, geogrids, geonets, geomembrane, geosynthetic clay liner, geocomposite and erosion control geosynthetics.

This investigation presents direct lab shear tests of different geosynthetic/geosynthetic and soil/geosynthetic interfaces, the corresponding evaluation of these experiments and the study of its strength behaviour, analysing the shear interaction mechanisms. Then, given that one of the weakest contacts is between geotextile and geomembrane, a constitutive model was developed and its implementation was carried out for numerical simulations of the geotextile/geomembrane interface interaction. Finally, the lab test results were compared with the model and numerical results.

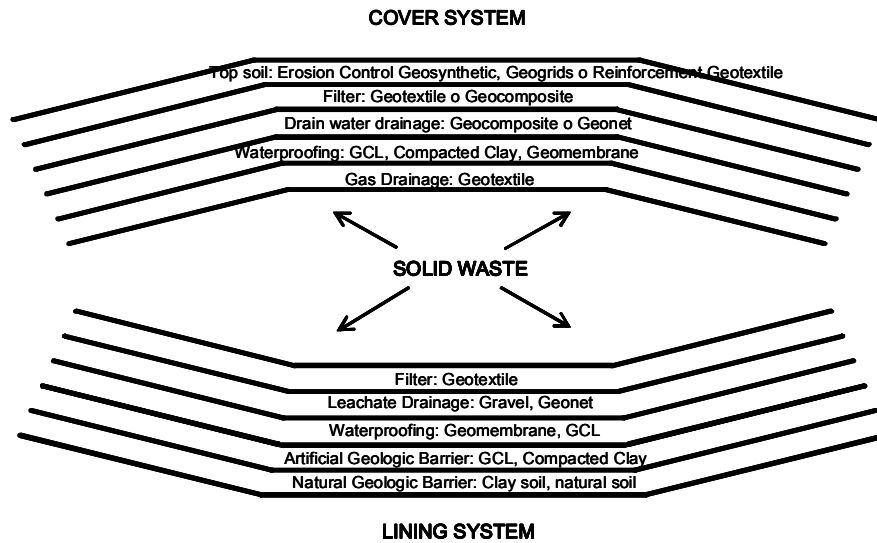


Figure 1. Sketch of a basic section landfill

2. Review of previous work

In this research the direct shear test was used to carry out tests between two geosynthetics and between one soil and one geosynthetic. The decision to use this type of test was taken after studying different standards: ASTM D 5321-02, ISO 12957-1:2005, ISO 12957-2:2005, and the different research done by different authors: Koerner (1990), Mitchell *et al.* (1990), Stark and Poeppl (1994), Fox *et al.* (1997), Jones and Dixon. (1998), Wasti and Özdüzgün (2001), Zornberg *et al.* (2005), Hebel *et al.* (2005). The main conclusions reached of this study were:

- Most of authors used direct shear test modifying the conventional direct shear machine for soils. The advantage of the direct shear test: simplicity and capacity to test many interfaces soil/geosynthetic and geosynthetic/geosynthetic in a short time
- Most authors used large size samples, larger or equal to 300 mm x 300 mm, to represent the material better and to reduce boundary effects.
- The direct shear box can be a conventional direct shear box or pull out box as both methods give similar results
- The main disadvantage of the direct shear test is the limited horizontal displacement and sometimes the residual stress value is not reached. Therefore, the ring shear test is an alternative to direct shear test. This test achieves residual shear stress but the ring has some disadvantages as sample size is very small and the shear direction continuously changes. This situation does not model field conditions.

- Another alternative is the tilting plane test. This test is suitable for normal stress less than 50 kPa, it reaches less shear resistance parameters than direct shear test, but it is not possible to test high normal stresses.
- Both standards ASTM D 5321-02 and ISO 12957-1:2005 allows the user to design direct shear machines and geosynthetics fix systems, carrying out the minimum characteristics demanded by these standards. The standard ASTM D 5321-02 offers more alternatives to carry out different tests than ISO 12957-1.
- Both standards, ASTM D 5321-02 and ISO 12957-1:2005, and mentioned research coincide with basic properties of the support to fix the geosynthetics: horizontal, rigid, rough and porous.

These conclusions, the differences between standards and between researches mentioned above, the decision to use the direct shear test with conventional large shear box size was made, following the standard ASTM D 5321-02.

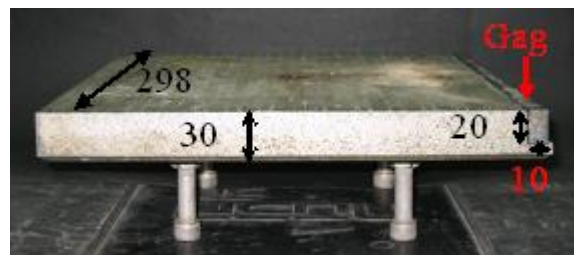
3. Large direct shear test methodology

Testing equipment

The direct shear machine is a standing apparatus 2.4 m long, 0.55 m wide and 1.35 m high (see Figure 2). The normal stress and horizontal displacement rate is controlled. The dimensions of shear box are 300 mm long by 300 mm wide. These values are enough to minimize boundary effects and to represent no homogeneous samples. The first time this apparatus is designed to test soil and gravel. However, to test geosynthetics a comercial fix system is added (Figure 3). This support system measures 298 mm long, 298 mm wide and 30 mm thick with adjustable height, and it has a clamp on one side to fix the geosynthetic. This support is completed with texture plate developed in this investigation (see Figure 4). The texture plate has teeth to fix the geosynthetics. These elements are placed inside the bottom of the shear box. The technical specifications of large digital shear machine are summarized in Table 1.

Table 1. Technical specifications for the direct shear machine

Feature	Specification
Specimen area (plan view)	300 mm x 300 mm
Allowed introduce specimen area	150 mm x 150 mm 225 mm x 225 mm
Maximum specimen thickness	200 mm
Maximum normal force	100 kN
Maximum horizontal force	100 kN
Maximum horizontal displacement	60 mm
Range of horizontal displacement	0 to 10 mm/min
Weight	930 kp

**Figure 2.** Large direct shear machine**Figure 3.** Bottom steel support for geosynthetics. Size 298x 298x30 mm

Texture plate

The new developed geosynthetic fix system consists of a steel piece that has the following characteristics:

- The rough face stops the geosynthetics from sliding for all test stress ranges.
- The rough face ought not to damage the materials.
- It allows the fluid to flow, drain and moisten the geosynthetic.

Figure 4 shows the new piece (patented application register number ES200800483). It is a rectangular steel plate, 299 mm x 284 mm x 10 mm, which has 210 drainage holes and 1680 pyramids 1 mm high, which protrude from the top face. The bottom face has 16 canals to allow water flow. This piece is screwed on to a steel support that it is placed into the direct shear box.

The texture plate gives the following advantages:

- The same fix system for several types of geosynthetics
- Quick and simple assembly and dismantling
- It avoids geosynthetic slides, creases and folds with regards to rigid support
- It does not cause damage to geosynthetics
- This method replaces soil as a support system and therefore uses less time to carry out the test.

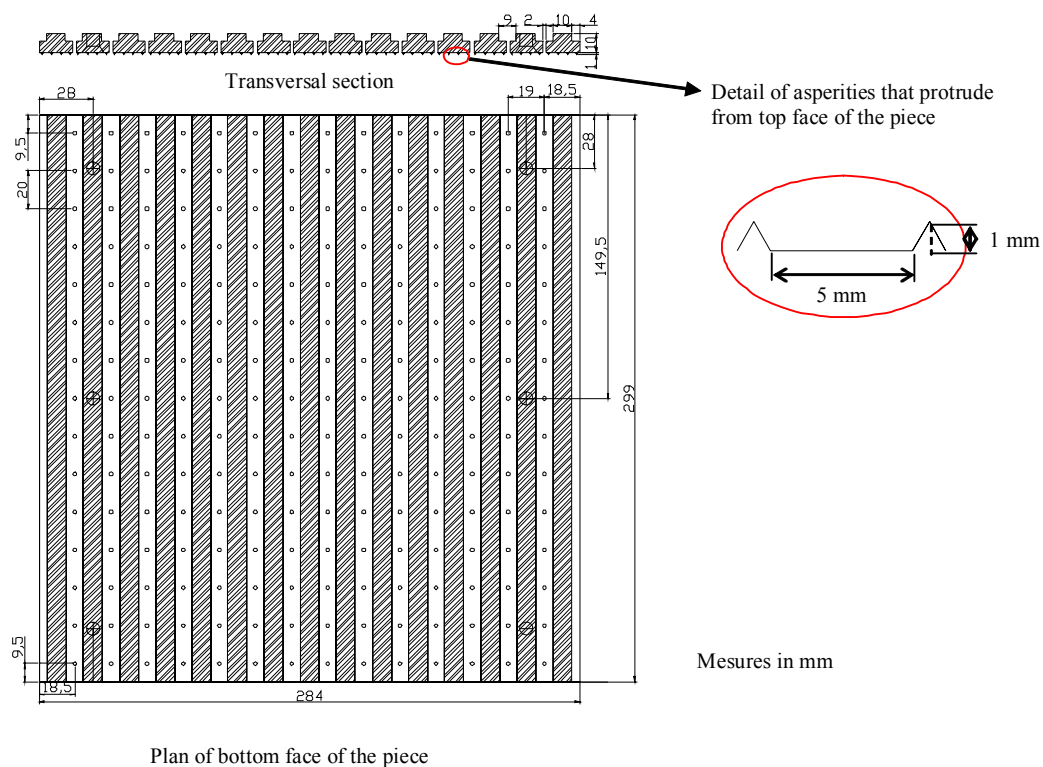


Figure 4. Texture plate

Materials tested

In this investigation, 233 large direct shear tests of different interfaces were carried out, which can be used in the side slope of the lining system of solid waste landfills: geomembrane/geotextile (GT/GM), Geosynthetic Clay Liner/geomembrane (GCL/GM), soil/geomembrane (Soil/GM), geomembrane/geocomposite (GM/GC), geocomposite/Geosynthetic Clay Liner (GC/GCL), geotextile/soil (GT/soil) and soil/geogrid/geocomposite (Soil/GG/GC).

In this thesis summary only four interfaces testing are presented: GT/GM, GC/GCL, GCL/GM, Soil/GM:

- GT: non woven needle punched multifilament geotextile (mass/area=500 g/m²)
- GM: HDPE texture geomembrane, thickness 1.5 mm
- Soil: sandy clay, LL=45%, IP=21.3%, Modified Proctor ($\gamma_{\max}=19$ kN/m³, $W_{\text{opt}}=12\%$)
- GCL: Geosynthetic Clay Liner (mass/area 5000g/m²) with reinforce fibers and granular bentonite is held between a woven and a non-woven geotextiles. Testing non woven face.
- GC: Drainage geocomposite (950 g/m²) consist of one geonet between two non woven geotextiles

All interfaces were tested with the geosynthetics placed the machine direction parallel to the shearing plane.

Procedures

The direct shear apparatus has a moving container, lower shear box, and another stationary, upper box. The moving of the travelling container is only in a direction parallel to that of applied shear force. As shown in Figure 5, one geosynthetic is firmly fixed to one half of the test device with soil or other geosynthetic on the other half. After normal stress is applied, shear force is mobilized until sliding occurs between the geosynthetic and the soil or the other geosynthetic.

To apply the normal stress a rigid load plate is used. The shear force is measured using a dynamometric ring. Two linear variable differential transformers (LVDT) are used to measure horizontal and vertical displacement of the specimen during the consolidation and shear phase.

The conditions and velocities of the different tests are shown in Figure 5. This sketch presents the values of hydration time, consolidation time and horizontal displacement rate, depending on type of interface and test conditions: dry or wet. These values are the results of study and analysis of different research, Fox *et al.* (1998), Gilbert *et al.* (1996), Eid *et al.* (1999), Nye and Fox (2007), Pasqualini *et al.* (2002), Stark and Poeppel (1994), Sharma *et al.* (2007), Triplett and Fox (2001), Zornberg *et al.* (2005). Data of direct shear test is shown in Table 2.

Table 2. Summary of conditions test

Interface	Size sample (mm)	Range normal stress (kPa)	Test condition	thydra. (h)	tconsol. (min)	Shear rate (mm/min)
GT/GM	300x285	14-450	wet	24/0	10	5
GC/GCL	300x285	100-500	dry	0/0	10	5
GCL/GM	300x285	100-500	wet	48/0	1440	0.055
Soil/GM	200x200	100-500	dry	0/0	10	1

The normal stress represents the normal load applied to the base lining system. The shearing was carried out until a horizontal displacement of 50 mm was achieved. The situation of the geosynthetics inside the machine is shown in Figure 5, as necessary devices. The test procedures were carried out in compliance with ASTM D5321-02 and included a specific methodology and the new geosynthetic fix system developed in this research. The readings during shearing were taken automatically by a computerized data logging system.

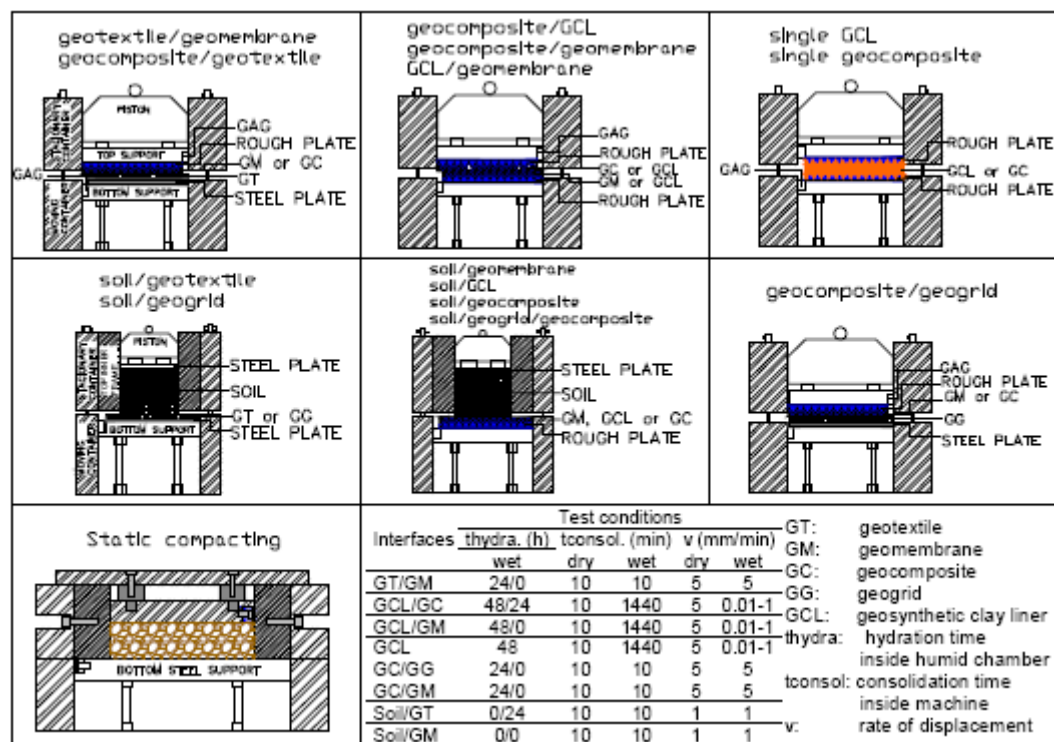


Figure 5. Summary of large direct shear methodology for geosynthetics

4. Analysis of results

Figure 10 and 11 show the direct shear test is repeated at different normal stress, the data is plotted, a trend is established, and the Coulomb failure criterion, $\tau = c_a + \sigma \cdot \tan \phi$, is adjusted, where τ is the shear strength, c_a is the adhesion, σ is the normal stress and ϕ is the friction angle. The parameters c_a and ϕ , are only useful for the range of normal stress tested. Adhesion, c_a must be considered as an adjustment parameter without physical significance. It takes negative values when the slope of the failure line increases with the normal stress.

From the results, the strength behaviour was studied, as well as, analysing the developed interaction mechanism between tested materials.

Next, as a representative example of the research carried out, some interfaces, shown in Table 2, are briefly analysed: geotextile/geomembrane, geocomposite/GCL, GCL/geomembrane and soil/geomembrane. These tests are a small part of the investigation.

Direct shear test on geotextile/geomembrane

The shear stress versus horizontal displacement curves are illustrated in Figure 6. The peak shear stresses were mobilized at displacements of 2 mm to lower normal stress than 50 kPa, and between 7 mm and 12 mm to normal stress range 50-450 kPa. At low normal stress the shear stress reaches the peak and maintaining it until the end of the test. At normal stress higher than 50 kPa the curves after reaching the peak shear stress fall until they achieve residual value, showing strain-softening behaviour.

In this way, the interaction mechanism of the contact is different at low and high normal stress. This interface type shows two different mechanisms: hook and loop and frictional. At low normal stress the hook and loop and friction mechanism are small in superficial level and specific contacts. However, at high normal stress the geotextile becomes compressed and increasingly interbedded between the macroroughness of the contacting geomembrane resulting in matrix level frictional and hook and loop interactions.

The peak and residual failure envelopes are curves but each one can be represented by straight lines, with friction angles of 30° and 19° respectively as Figures 10 and 11 depict. This graphic shows peak and residual failure envelopes of different tests carried out.

The samples were observed after testing, checking that geotextiles fibers were separated, stretched and oriented in shear direction, at normal stress higher than 50 kPa. This damage provides the strain-softening behaviour observed. Furthermore, at 450 kPa normal stress, some asperities of the geomembrane were damaged.

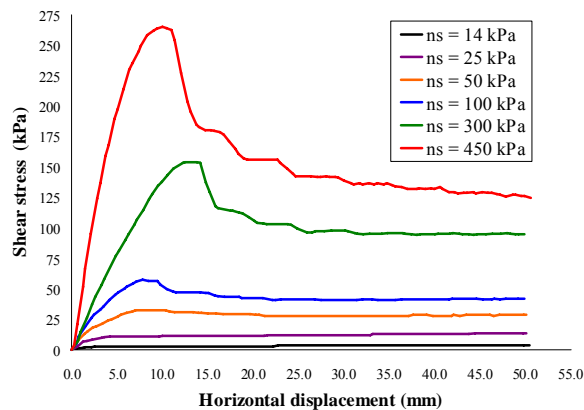


Figure 6. Shear stress-displacement curves for interface GT/GM

Direct shear test on drainage geocomposite/GCL

The shear stress versus horizontal displacement curves are illustrated in Figure 7. The maximum shear stresses were mobilized at displacements of 7.5-12 mm.

The GCL/drainage geocomposite interface shear strength behaviour, tested in dry conditions, is influenced by the thickness and stiffness of the geonet. In this way, the higher the thickness and stiffness the higher shear resistance, because the geonet embeds in the GCL.

In this case, the peak and residual friction angles and adhesion values were 26° , -21 kPa and 18° , -2 kPa respectively, as depicted in Figures 10 and 11. The failure plane of all tests is between the geocomposite and GCL.

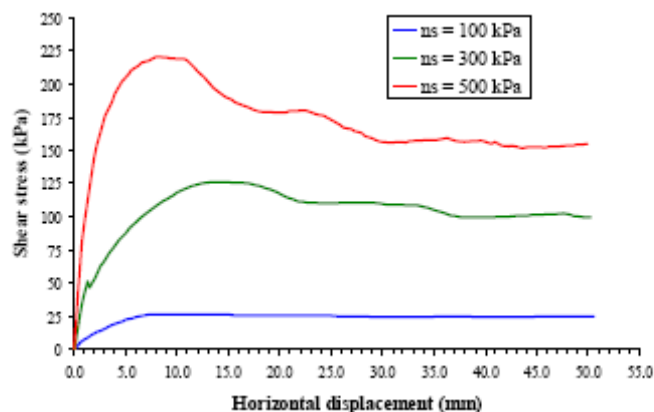


Figure 7. Shear stress-displacement curves for interface GC/GCL

Direct shear test on GCL/geomembrane

Figure 8 shows the results from wet conditions GCL/GM interface test. The peak shear stresses were mobilized at displacements of 6-7 mm. After that, the curve falls quickly to reach the residual value.

The GCL becomes compressed and interbedding between geomembrane texture causes geomembrane-GCL contact friction to be higher than internal GCL friction. In this case, the tests showed failure plane inside GCL, between woven geotextile and bentonite layer.

The shear resistances parameters obtained from lineal adjustment were: peak friction angle and adhesion values, 4° and 39 kPa, residual adhesion, 9 kPa as showed in Figures 10 and 11.

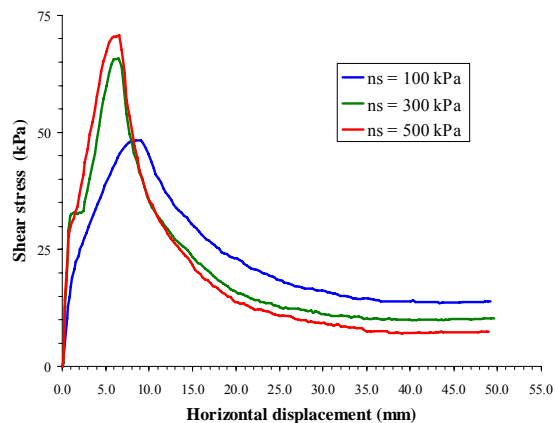


Figure 8. Shear stress-displacement curves for interface GCL/GM

Direct shear test on soil/geomembrane

Figure 9 presents shear stress versus horizontal displacement curves. These curves show strain softening behaviour. Firstly shear stress reaches a peak and then the curve falls to residual value. The peak shear stresses were mobilized at displacements of 6-7.5 mm. The peak and residual friction angles and adhesion values were 34° , -41 kPa and 23° , -28 kPa respectively as depicted in Figures 10 and 11.

The interaction mechanism are soil-geomembrane contact and internal soil friction. The higher the accumulated soil between asperities the higher the shear strength.

After testing, the samples were checked. The bigger asperities of geomembrane were placed in the opposite direction of the shear direction. Some of them flattened as they

came into contact with the gravel. It was observed that some soil stayed between the asperities as in Figure 12.

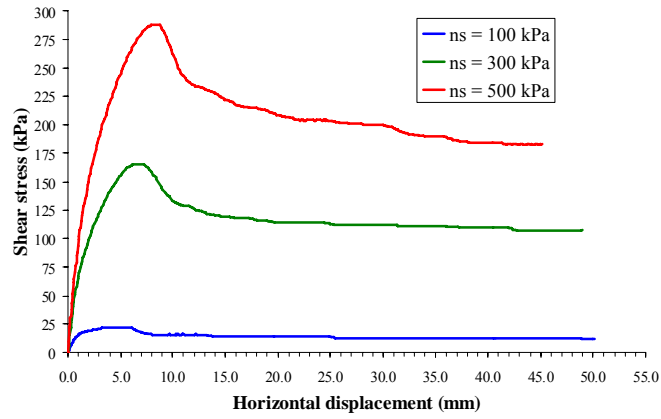


Figure 9. Shear stress-displacement curves for interface soil/GM

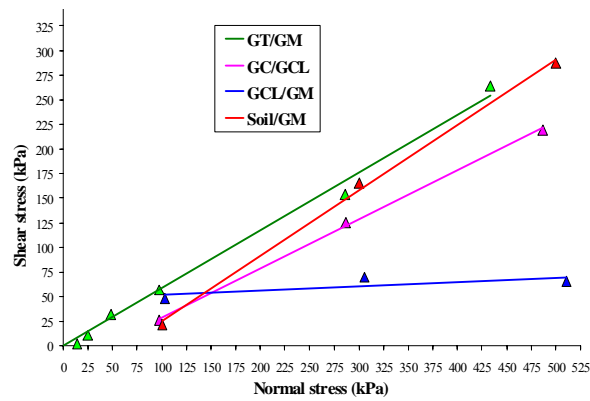


Figure 10. Peak failure envelopes

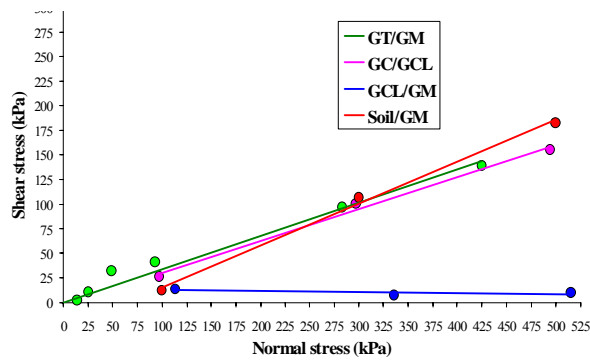


Figure 11. Residual failure envelopes

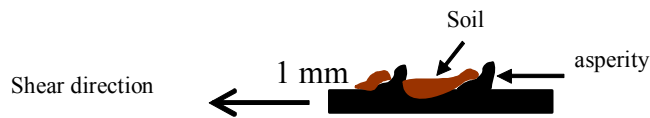


Figure 12. Contact between soil and texture geomembrane

5. Model and numerical analysis of the direct shear test

Frequently, interface shear strength presents a non-linear behaviour. In this case, Coulomb parameters (c_a , ϕ) are not much safer or realistic. For this reason, a new strength model and three-dimensional numerical analysis of the mechanical response of the textured geomembrane/nonwoven geotextile interface in direct shear were developed. The model was developed to simulate progressive failure of textured geomembrane/nonwoven geotextile interface, and it was used to investigate mechanisms of progressive interface failure and factors that control its significance.

Shear strength model

The shear strength model of textured geomembrane/nonwoven geotextile interface arose from the resemblances between the roughness rock joint and geomembrane/geotextile interface behaviour. Therefore, this model has been developed following the research of Barton (1973), Barton and Choubey (1977), Bandis et al. (1983), Barton et al. (1985), Stark et al. (1996), and the geosynthetic interface interaction mechanism from Hebelier et al. (2005). Achieving an equation of the following type:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[HL \cdot I \cdot \log \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (1)$$

where

τ maximum shear stress (strength) of a textured geomembrane/non-woven geotextile

σ_n normal stress

HL hook and loop coefficient

I interbedding coefficient

GCS geotextile reference compression stress

ϕ_r residual friction angle

Geotextile reference compression stress (GCS)

The geotextile compression stress (*GCS*) is a reference value for the normal stress on the geotextile which corresponds to a normal deformation of 0.8 for the geotextile (Figure 13). *GCS* controls the shear strength of the textured geomembrane/geotextile interface, which is influenced by the amount of interbedded, asperity and fibers damage. The *GCS* value is calculated from the relation between normal stress and vertical deformation of the geotextile. This relation is based on standard ISO 9863-1:2005 (procedure B). To measure compressibility and deduce *GCS* a uniaxial test system was used. The applied normal stresses varied from 2 to 35000 kPa. The *GCS* values of tested geotextiles were: GT_nwnp_mf (nonwoven needle punched monofilament): 15000 kPa, GT_nwnp_st (nonwoven needle punched staple fibers): 4000 KPa and GT_nwhb_mf (nonwoven heat bonded monofilament): 35000 kPa.

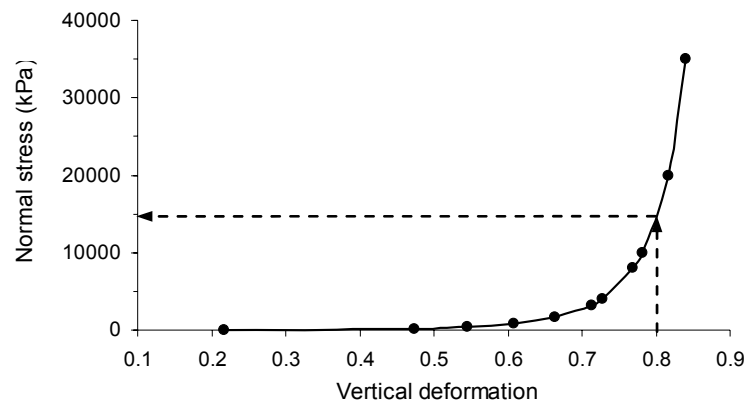


Figure 13. Compressibility of GT_nwnp_mf

Hook and Loop (HL)

The hook and loop coefficient (HL) represents the engagement of the geotextile fibers (“loop” structure) by geomembrane roughness (“hook” material). To obtain the hook and loop value, *HL*, first the *R* value has to be determined by back-analysing shear tests on the basis:

$$R = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) - \phi_{residual}}{\log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right)} \quad (2)$$

Next, R is plotted versus normal stress as shown in Fig. 14. From these graphs the hook and loop parameter (HL) is obtained for each geomembrane/geotextile interface. The HL value is the intersection between the linear regression lines and *the horizontal axis* (R). The HL value depends mainly on the roughness of the geomembrane. For geomembranes with macrotexture > 1 mm (GMr3 and GMr2_s1), the HL value is between 4 and 8, and for geomembranes with macrotexture < 1 mm (GMr1, GMr2_s2 and GMr4), the HL values is between 2 and 4. This fact has a great influence on the peak shear strength value and the strain-softening behaviour.

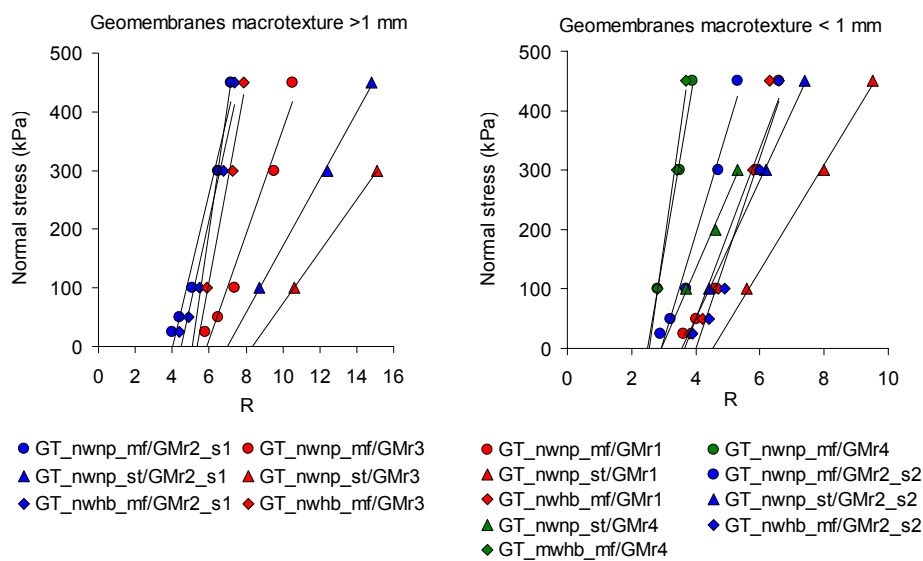


Figura 14. R vs. normal stress from geomembranes with macrotexture > 1 mm and < 1 mm

Interbedding (I)

The interbedding coefficient (I) between the macrotextural features of geomembrane and geotextile. To obtain individual interbedding parameter as a function of normal stress was plotted I vs. $R/\log(GCS/\sigma_n)$ for different material combinations, where I value is equal to $\frac{R}{HL}$. Next, linear relations were obtained by least squares fitting, as documented exemplary in Fig. 15 for GT_nwnp_mf/geomembrane interfaces. The interbedding coefficient increases with increasing normal stress. The following functional relation can be obtained, where M and N are constants from the least re fitting:

$$I = \frac{N \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right)}{\log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) - M \cdot HL} \quad (3)$$

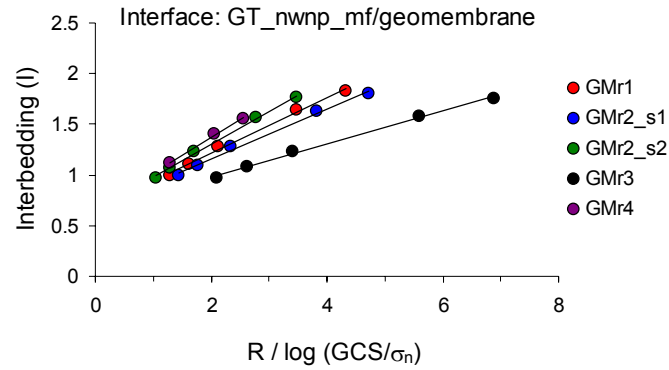


Figure 15. Interbedding for nonwoven geotextile/geomembrane interfaces

Numerical analysis using FLAC^{3D}

To carry out numerical analysis the code FLAC^{3D} was used. This code is a three-dimensional explicit finite-difference program to solve mechanical behaviour of a continuous medium as it reaches equilibrium or steady flow.

Model setup

Design of the geometry: to model the geosynthetics two sub-grids are used, one is the geomembrane (top sub-grid) and another is the geotextile (bottom sub-grid). An interface is used to represent the contact plane between the geomembrane and the geotextile, see Figure 16 a). Later on, a normal stress is applied before the shear started (Figure 16 b)).

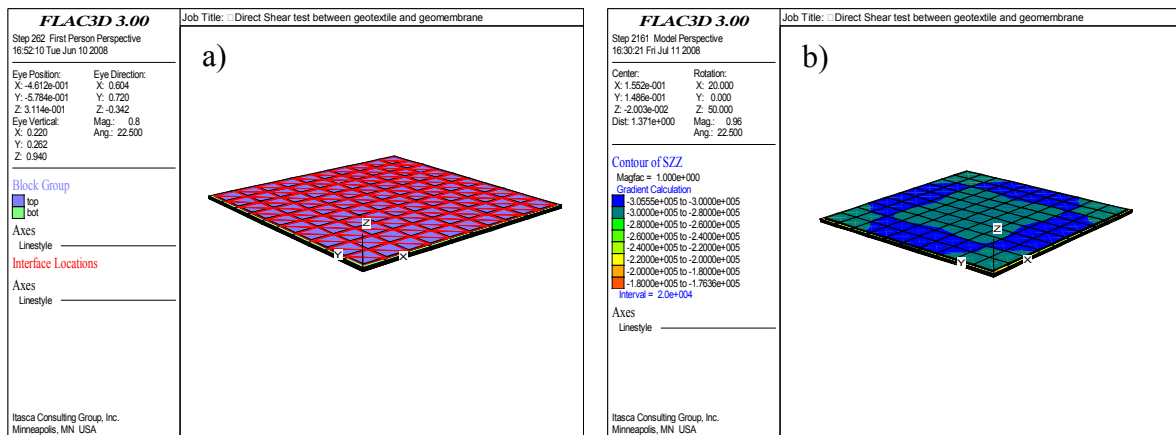


Figure 16. a) Interface between two sub-grids b) Initial conditions: application normal stress

Modelling procedure

Figure 17 a) shows however the direct shear test is simulated by applying a horizontal velocity to the top sub-grid, to produce a shear displacement along the interface.

Figure 17 b) presents the shear stress-shear displacement curve. The loading is initially linear, and then becomes nonlinear as interface begins to fail until the peak shear strength, after that the shear strength decreases up to post-peak (residual) value. The plot also indicates whether stresses within a zone are currently on the yield surface (black points) or the zone has failed on the past (red points)

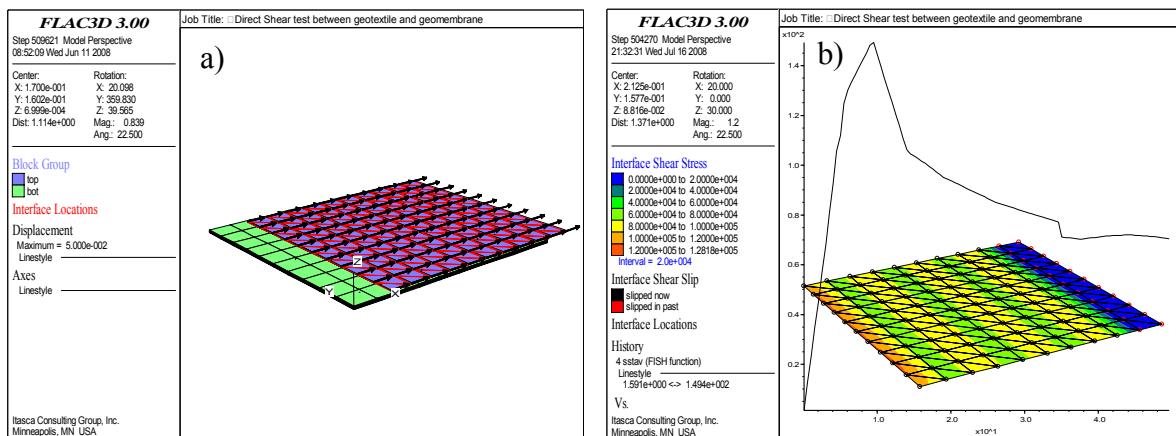


Figure 17. a) Direct shear test model. b) Interpretation of results

Analysis of results

Figure 18 shows examples of the shear stress-displacement data obtained from different geotextiles/geomembranes interfaces: GT_nwhb/GMr3, GT_nwnp_mf/GMr1 and GT_nwnp_st/GMr4. These interfaces were tested at different normal stress levels and compared with the numerical model (right diagram). Good agreement between the numerical model and the direct shear test is indicated.

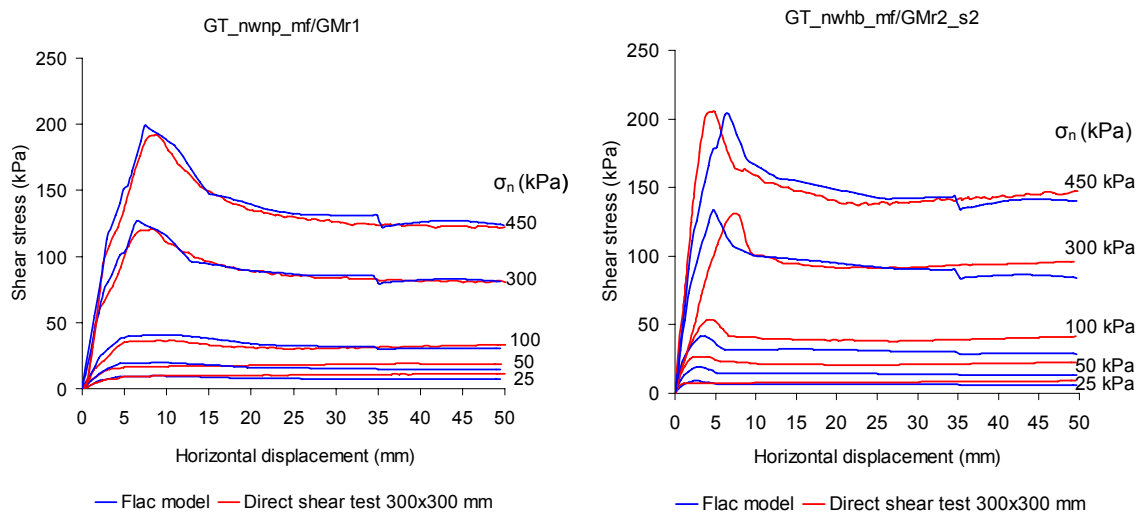


Figure 18. Comparison model regarding laboratory measured data

Presentación de la tesis

La presente tesis doctoral se divide en cuatro capítulos. Estos capítulos están precedidos por los siguientes elementos: lista de figuras, lista de tablas, notación empleada, el resumen de la tesis, en español e inglés y la presentación del documento.

Previamente se presenta una introducción de la situación medioambiental en materia de vertederos de residuos sólidos urbanos, así como la motivación y objetivos de la investigación.

El capítulo 1 es el estado del conocimiento, donde se repasa tipos y funciones de los diferentes geosintéticos, se cita diferentes tipos de roturas de vertederos, se revisa las investigaciones llevadas a cabo por diferentes autores para la realización del ensayo de corte directo de las interfaces geosintético/geosintético y suelo/geosintético, y se enumera los modelos de comportamiento de las juntas de roca, que son la base del modelo desarrollado de resistencia al corte de la interfaz geomembrana/geotextil.

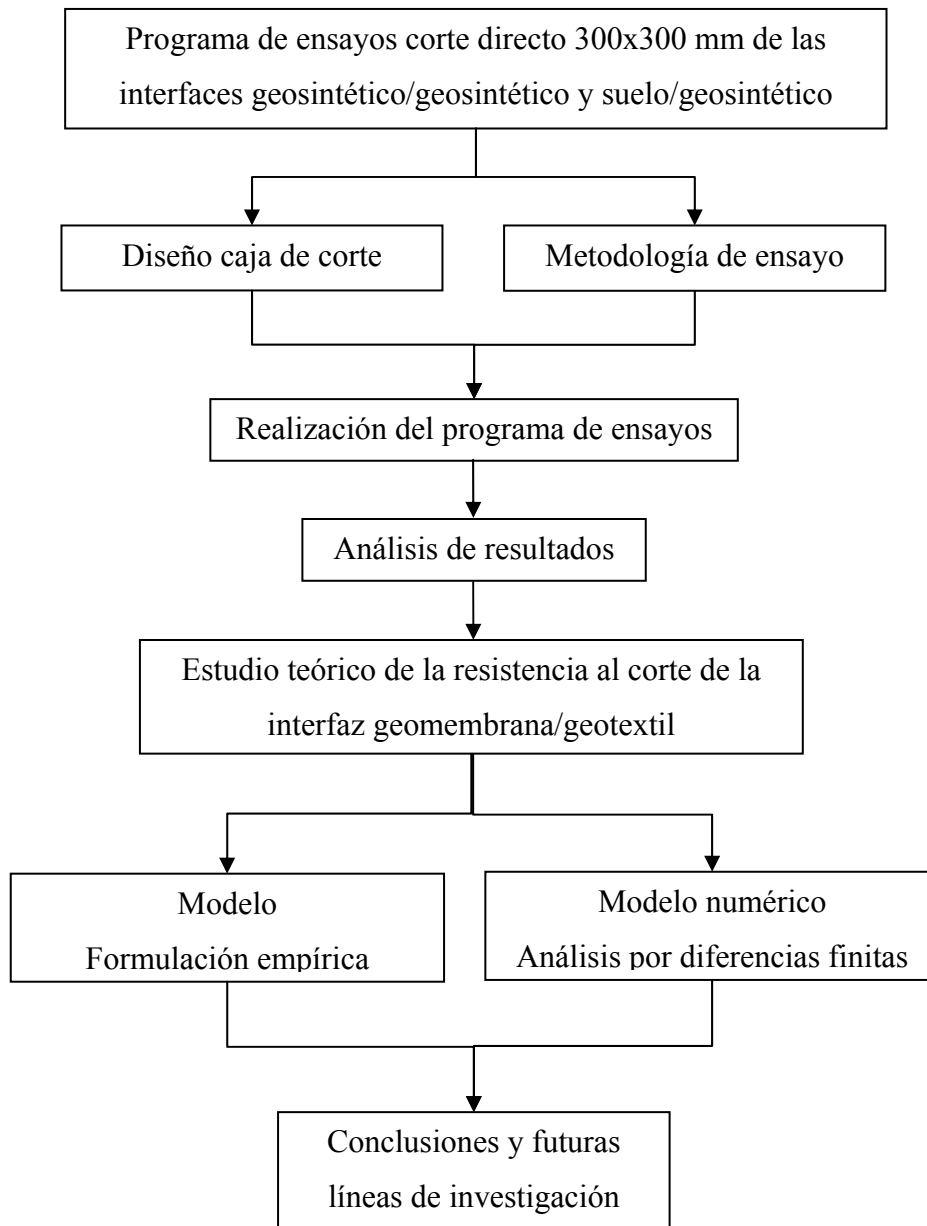
El capítulo 2 presenta la metodología de ensayo de corte directo para las interfaces geosintético/geosintético y suelo/geosintético y obtención de los parámetros resistentes al corte.

El capítulo 3 presenta el análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio de las diferentes interfaces ensayadas, y se describe el comportamiento resistente al deslizamiento de cada contacto.

El capítulo 4 desarrolla un modelo de comportamiento resistente al corte y el análisis numérico para la interfaz geomembrana rugosa/geotextil no tejido.

Finalmente se establecen las principales conclusiones que se derivan de esta tesis doctoral, recogiendo así mismo, las futuras líneas de investigación que surgen de los estudios realizados.

A continuación se presenta un esquema de la metodología seguida en la tesis, para desarrollar todos los aspectos anteriores:



Esquema de la metodología de la tesis doctoral

Introducción

La Unión Europea es la segunda economía mundial tras los Estados Unidos. El crecimiento económico en el mundo desarrollado va asociado al uso intensivo de recursos.

La ampliación, los cambios demográficos y la globalización son factores impulsores de los cambios sociales en Europa. Uno de estos cambios es el aumento de las aglomeraciones urbanas, ya que los ciudadanos buscan una mejora de su calidad de vida y se trasladan allí donde las oportunidades laborales son mayores. Se estima que más del 80% de los europeos vivirán en áreas urbanas en el 2020. Por tanto la expansión urbana generará presión sobre la tierra, el transporte y el consumo. La mayoría de los nuevos hogares serán pequeños, reflejando los cambios sociales y el estilo de vida tal como el creciente número de familias de pocos miembros o personas que viven solas.

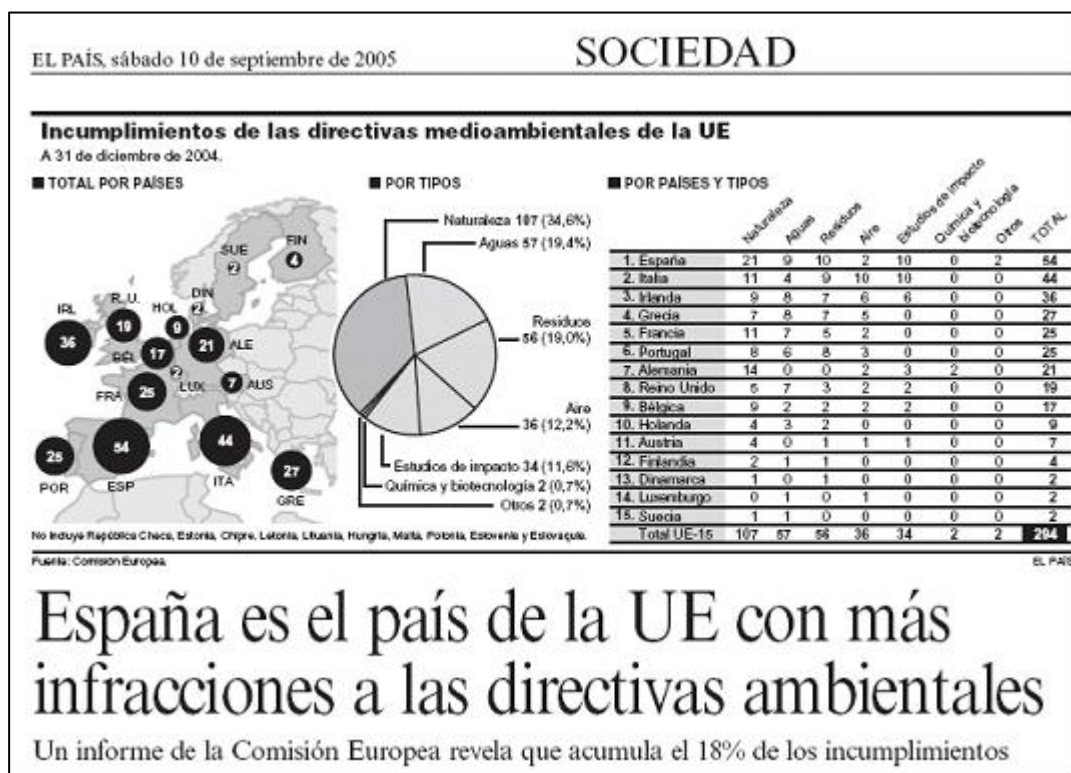
La gestión del medio ambiente de Europa y de su capital natural es importante para garantizar el capital social y económico a largo plazo. Uno de los aspectos de mayor relevancia a gestionar, junto al consumo de energía y a los sucesos catastróficos relacionados con el clima y el tiempo, es la generación de residuos cada vez mayor debido al crecimiento económico y a los patrones de consumo (por ejemplo el aumento del consumo de productos envasados, cuyos envases se suman al crecimiento de residuos de embalaje provenientes de los hogares). Las opciones de tratamiento de los residuos preocupan por sus impactos en el medio ambiente, y la salud de las personas. Decidir la ubicación de las incineradoras es un asunto controvertido en muchos países, y la opción de los vertederos a menudo se ve limitada por el espacio y la contestación social, además de por el temor a la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

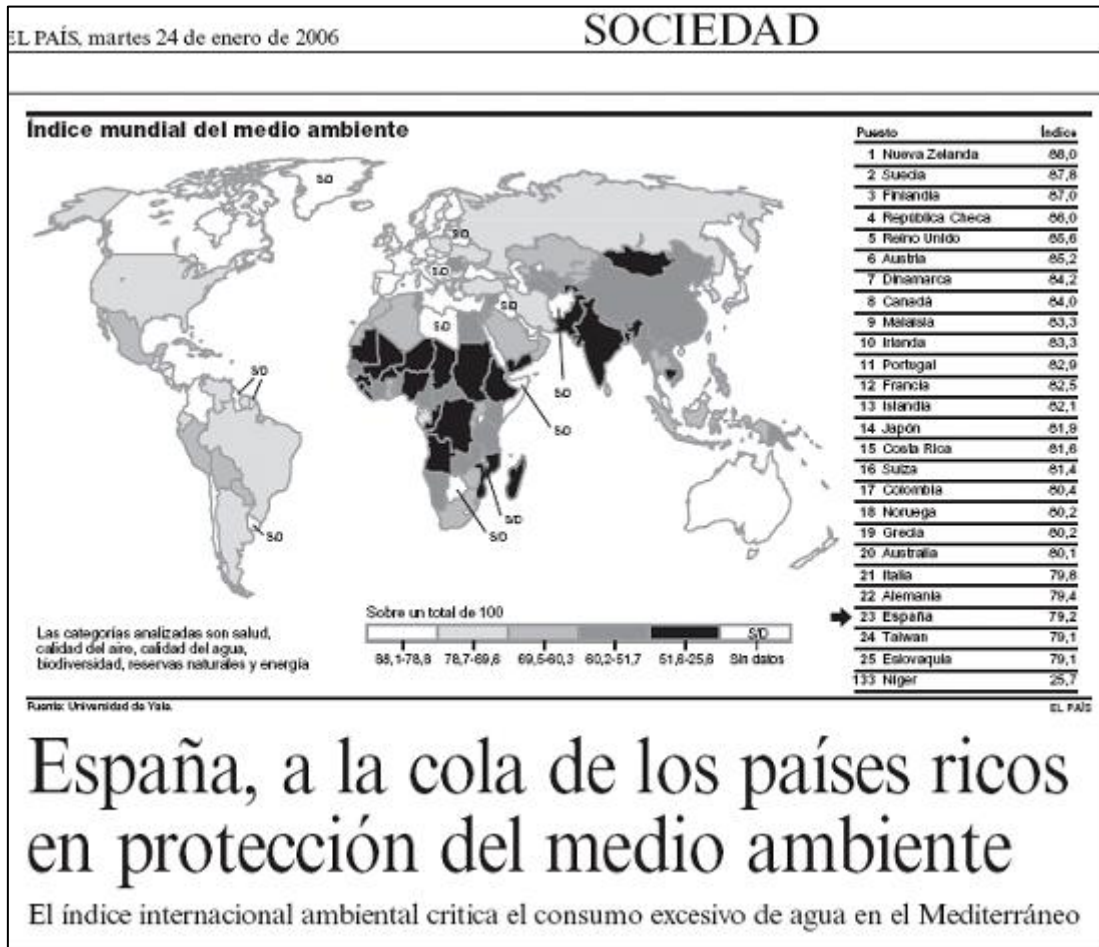
En las últimas décadas, España ha seguido la estela del crecimiento económico europeo como una de las economías más dinámicas dentro de Europa. Este desarrollo económico ha supuesto una mejora de la calidad de vida de la mayoría de los españoles, aunque el coste medio ambiental es muy elevado, sobre todo a largo plazo. Según el Ministerio de Medio Ambiente, actualmente en España:

- aumenta el tamaño de las aglomeraciones urbanas y la ocupación del litoral
- se incrementan las emisiones de gases de "efecto invernadero"

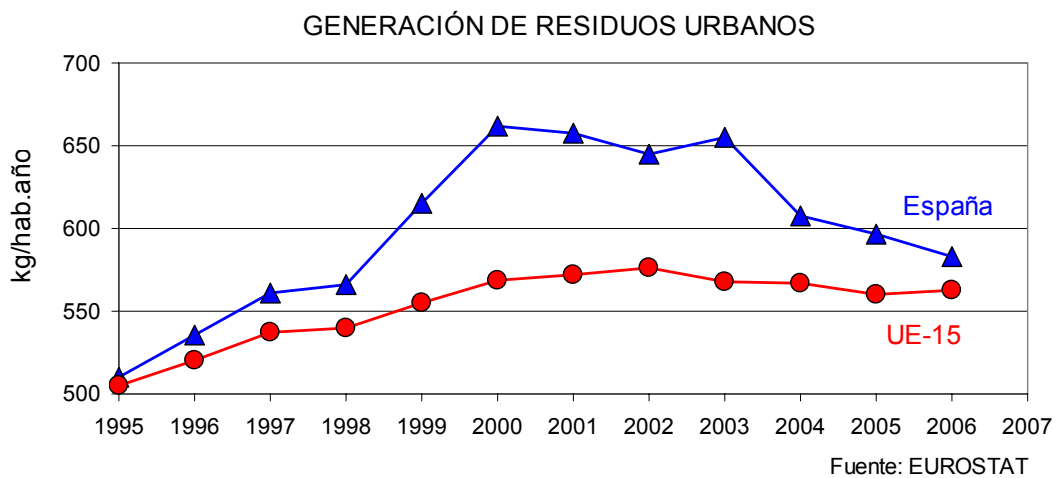
- crece la demanda de transporte de mercancías y de pasajeros por encima de la media europea
- existen cada vez más residuos
- subsisten las amenazas sobre ecosistemas terrestres y marítimos
- disminuye la capacidad de pesca
- urge una mejor eficiencia en el uso del agua y en el de la energía
- hay una mala utilización y abuso de fertilizantes sintéticos y plaguicidas.

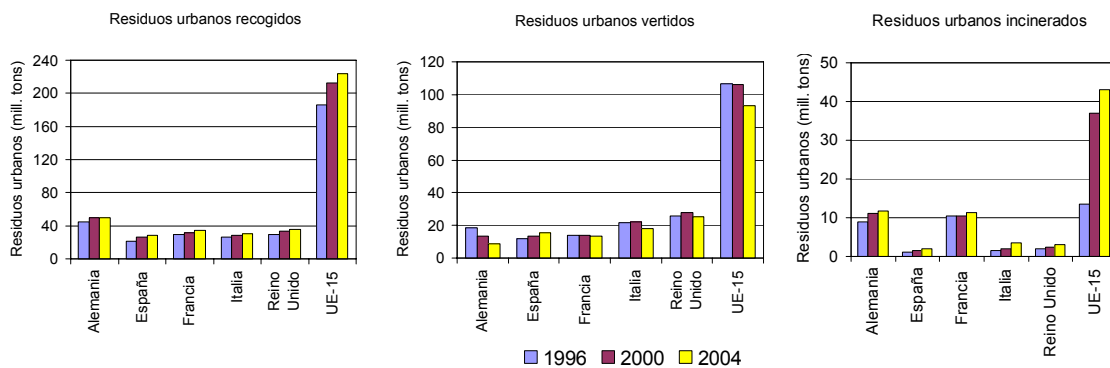
La situación medio ambiental de España dentro del marco europeo, la resumen los siguientes titulares del diario El País:





Uno de los problemas más importantes relacionados con el medio ambiente es la generación creciente y constante de residuos urbanos:





Fuente: EUROSTAT

La Comunidad Europea adoptó la Directiva 91/156/CEE y la Directiva 1999/31/CE, para establecer las premisas comunitarias sobre la gestión de residuos y vertidos, respectivamente, que deben cumplir todos los Estados miembros. La adaptación de la Directiva 91/156/CEE al Estado español dio lugar a la Ley 10/1998 que establece las normas para la gestión de residuos, siendo complementada por el Real Decreto 1481/2001 (adaptación de la Directiva 1999/31/CE), que constituye un reglamento para la eliminación de residuos mediante su depósito en vertederos con el objeto de prevenir los efectos ambientales negativos del vertido. Dentro de la Ley 10/1998 y el RD 1481/2001 se definen los distintos tipos de residuos:

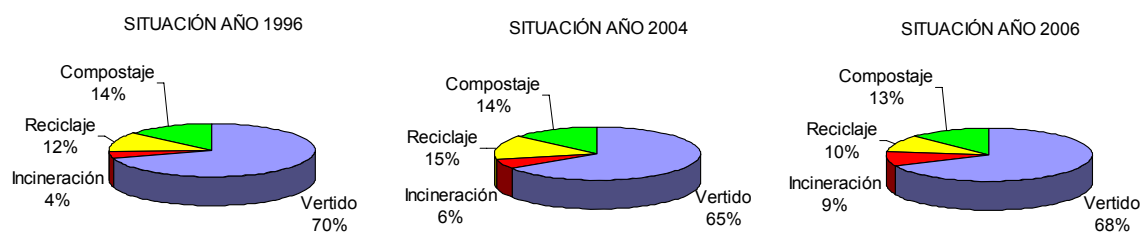
- «Residuos urbanos o municipales»: los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, residuos procedentes de la limpieza de las vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, animales domésticos muertos, muebles, enseres y vehículos abandonados, residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria
- «Residuos peligrosos»: objetos, sustancias y preparados que presenten o puedan presentar riesgos inmediatos o diferidos para la salud humana y el medio ambiente. El RD 952/1997 contiene la lista de residuos peligrosos.
- «Residuos no peligrosos»: los residuos no incluidos en la lista de residuos tóxicos y peligrosos del RD 952/1997.
- «Residuos inertes»: aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.

Actualmente en España se están generando más de 23 millones de toneladas al año de residuos urbanos, resultando una tasa de generación de 1.5 Kg. /habitante día y una producción aproximada de 550 Kg. /habitante año. La gestión de estos residuos urbanos

viene establecida en el Plan Nacional de Residuos Urbanos (2000-2006), elaborado a partir de la Ley 10/1998, donde se fijan las siguientes opciones de gestión:

- Reciclado
- Compostaje
- Incineración
- Eliminación en vertedero

En los gráficos y tabla siguientes se resume la situación de la gestión de los residuos urbanos según el Plan.



Fuente: Plan Nacional de residuos urbanos (2000-2006) y Borrador del Plan Nacional Integrado de Residuos (Octubre 2008)

Año	1996	2004	2006
Población (hab.)	39.669.394	43.197.684	45.200.737
Generación RU (ton)	17.175.186	22.807.748	24.078.306
Tasa generación RU (Kg./hab.día)	1.2	1.5	2
Producción RU (Kg./hab.año)	440	540	730

Fuente: MMA y Eurostat

En los gráficos se observa que más de la mitad de los residuos urbanos son depositados en vertederos.

En el pasado reciente, los vertederos eran básicamente zonas relativamente apartadas del centro de las poblaciones donde, sobre el terreno, se depositaba la basura para que se pudriera.

Este sistema es un riesgo potencial para el medio ambiente puesto que no impiden que los contaminantes (como metales pesados y toxinas) se filtren a través del terreno y contaminen las aguas subterráneas.

Si no se establecen los medios oportunos, los vertederos pueden contaminar:

- El aire, mediante emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) y CH₄ (metano); produciendo olores desagradables

- El agua, puesto que se produce la filtración de pesticidas, compuestos orgánicos, cianuro, nitratos y metales pesados en las aguas subterráneas.
- El suelo, ya que además de ocupar espacio, el terreno de apoyo se contamina con los materiales peligrosos depositados.

Para evitar estos riesgos, hoy en día, los vertederos son grandes y modernas instalaciones con aislamientos de protección y con sistemas de recogida de fluidos y gases que salen de los residuos en descomposición.

A la hora del diseño o explotación de un vertedero interesa, cada vez más, aumentar su capacidad por la carencia de espacio de ubicación disponible. Los depósitos de vertidos deben estar cerca del lugar donde se generan la mayor parte de los residuos, es decir los núcleos importantes de población. Pero, un vertedero supone molestias y ciertos riesgos, por lo que está sujeto a una fuerte contestación social, tanto mayor cuanto mayor densidad de población existe en su entorno.

La dificultad de ubicar nuevos vertederos obliga a aumentar sus dimensiones, tanto en altura como en área ocupada, lo que incrementa el riesgo de su inestabilidad. Por ello, paralelamente a la necesaria definición de los requerimientos sanitarios y de explotación, es fundamental tener en cuenta las condiciones geotécnicas de los vertederos para conseguir la seguridad suficiente frente a fenómenos de deslizamiento de la masa de residuos o rotura del terreno de apoyo.

En la investigación que se presenta, se aborda el estudio de las características resistentes al deslizamiento de los contactos o interfaces entre los diversos materiales, generalmente geosintéticos, que constituyen los sistemas de aislamiento de la masa de residuos.

Los resultados experimentales obtenidos, así como su interpretación bajo el enfoque de los mecanismos de interacción entre geosintéticos y entre suelo y geosintético, pretenden constituir una aportación al conocimiento del comportamiento resistente al deslizamiento de estos contactos. Con el objetivo de conseguir diseños de vertederos cada vez más ajustados a los requerimientos exigibles de seguridad frente a rotura.

Por tanto, la presente tesis consta de tres objetivos:

1. Creación de una metodología de ensayo de corte directo entre dos geosintéticos y entre un suelo y un geosintético para obtener los parámetros resistentes de las diferentes interfaces.
2. Estudio detallado de los mecanismos de interacción y rotura de los contactos ensayados.
3. Y por último el desarrollo de un modelo de contacto geosintético/geosintético que sea capaz de predecir y ajustar la variación de la resistencia al corte con respecto al desplazamiento horizontal, así como la introducción del modelo dentro de un programa numérico para su utilización en el diseño y cálculos de estabilidad de los vertederos.

1 Estado del conocimiento

1.1 Sección básica de un vertedero

Los vertederos de residuos sólidos urbanos modernos tienen varias funciones que se pueden sintetizar en los siguientes puntos (R.A. Mitchell y J. K. Mitchell, 1992):

- Acumular la máxima cantidad de residuos en el menor espacio posible
- Aislar los materiales residuales del entorno natural
- Proporcionar un área de terreno segura y útil después de la clausura

El RD 1481/2001 establece los criterios técnicos mínimos para el diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento posterior de los vertederos. En el marco de esta normativa, el reto de la ingeniería es conseguir depósitos estables con un sistema de aislamiento y protección que contenga la mayor cantidad de residuos posible e impida la filtración del lixiviado (líquido que percola a través de los residuos depositados) en el terreno.

El sistema de aislamiento y protección está constituido por una o varias barreras de protección. Éstas pueden construirse con capas de arcilla, geosintéticos o combinación de estos materiales.

Los geosintéticos son productos fabricados con material polimérico que son muy utilizados, en contacto con suelos y otros materiales, para aplicaciones geotécnicas en obras de ingeniería civil.

La utilización de materiales geosintéticos en la construcción de vertederos, durante los últimos veinte años, se debe principalmente a las siguientes ventajas que presentan (José M. Martínez, 2004):

- Reducción de cargas durante la instalación
- Reducción de la carga sobre los residuos
- Realización de taludes más verticales
- Disminución del espesor de las barreras de protección
- Aumento de la capacidad del vertedero
- Fácil y rápida colocación
- Solución flexible y fiable

La Figura 1.1 muestra el esquema básico de la sección transversal de un vertedero moderno, donde se ve como varios de estos materiales cumplen distintas funciones dentro del sistema de protección; filtración, separación, impermeabilización, drenaje y refuerzo.

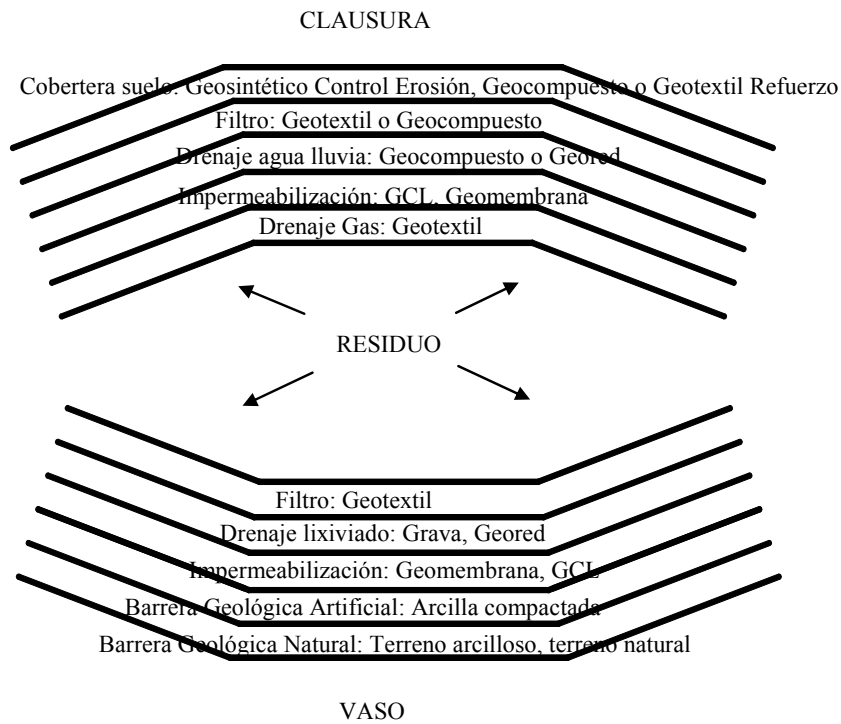


Figura 1.1 Sección transversal de un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU)



Figura 1.2 Vista aérea del vertedero de Meruelo (Cantabria)

1.2 Tipos de geosintéticos

Los tipos de geosintéticos que se emplean en vertederos se muestran en la Figura 1.3. A continuación se describe cada uno de ellos.

Geotextil. Es un material plano, flexible y permeable compuesto de fibras sintéticas o naturales, tejidas mecánicamente (geotextil tejido) o enredadas unas con otras de forma aleatoria (geotextil no tejido). Las funciones principales de los geotextiles son:

- Separación entre distintos materiales
- Refuerzo del material donde se encuentre inmerso, por su resistencia a tracción
- Filtración de líquidos a través de él, reteniendo partículas sólidas
- Drenaje en su plano

Geomalla. Es un geosintético formado por una red regular abierta, de elementos resistentes a tracción conectados íntegramente, que permiten entrelazarse con suelo y materiales circundantes. La principal función de las geomallas es el refuerzo.

Geored. Se trata de un geosintético, de polietileno de alta densidad, formado por varillas entrecruzadas, que permiten una adecuada circulación de líquidos o gases a través de ellos. Por tanto la función principal de las georedes es el drenaje.

Geomembrana. Es un geosintético impermeable compuesto de una o más láminas de material polimérico. La función principal de las geomembranas es la impermeabilización.

Geosynthetic Clay Liner o GCL. Se trata de una barrera impermeable compuesta por una capa de arcilla de espesor milimétrico pegada a una o varias láminas de material geosintético. La función principal de las GCLs es la impermeabilización.

Geocompuesto. Es un producto compuesto de uno o más materiales, al menos uno de los cuales es un geosintético, por ejemplo la combinación de un geotextil y una geored, un geotextil y una geomalla, etc. Las funciones de los geocompuestos dependen de los geosintéticos que las forman y pueden ser:

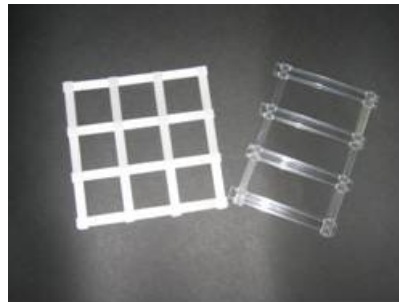
- Separación
- Refuerzo
- Filtración
- Drenaje
- Impermeabilización

Geosintéticos para control de la erosión. Pueden ser geocélulas o geoesteras. Ambos tipos de geosintéticos son estructuras tridimensionales permeables, poliméricas, pero la geocélula está fabricada con tiras de geotextil o geomallas unidas de forma alternativa, y la geoestera está fabricada con filamentos plásticos ligados entre sí. Las funciones principales son:

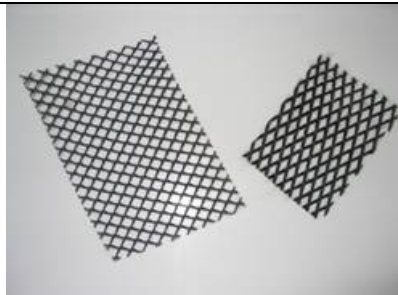
- Control de erosión
- Contención de suelos



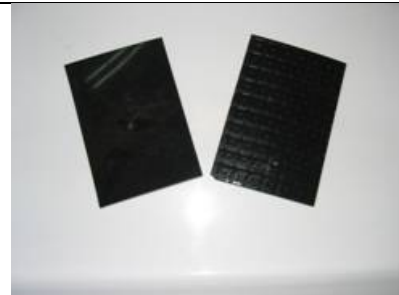
GEOTEXTILES



GEOMALLAS



GEOREDES



GEOMEMBRANAS



GEOSYNTHETIC CLAY LINERS



GEOCOMPUESTOS

Figura 1.3 Tipos de geosintéticos

1.3 Sistemas de protección de vertederos: vaso y sellado

El diseño y construcción de un sistema de protección depende en gran medida del tipo de residuo que se vaya a depositar y de las regularizaciones vigentes.

El RD 1481/2001 establece los criterios mínimos de impermeabilización (vaso) y sellado a utilizar en los diferentes tipos de vertederos: vertedero para residuos peligrosos, vertedero para residuos no peligrosos, y vertedero para residuos inertes.

Como criterio básico, los vertederos deben estar situados y diseñados de forma que se impida la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas y superficiales, además de garantizar la recogida eficaz de los lixiviados.

La protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales, se logra mediante el sistema de protección que constituye la impermeabilización del vaso del vertedero.

La impermeabilización está formada por la combinación de una barrera geológica, de un revestimiento artificial impermeable y de unas capas de drenaje de lixiviados, que se disponen bajo la masa de residuos.

Los sistemas de impermeabilización que se presentan en España son de dos tipos:

- sistema de impermeabilización sencillo
- sistema de impermeabilización doble

El sistema de impermeabilización sencillo incluye:

- *una barrera de protección* formada por:
 1. una barrera geológica natural, cuando el terreno natural del subsuelo consiste en un material arcilloso adecuado,
 2. una barrera geológica artificial, colocando una capa de relleno arcilloso compactado o una GCL,
 3. un revestimiento artificial impermeable, disponiendo una geomembrana
- *un sistema de recogida de lixiviado*, colocado sobre la barrera de protección y bajo la masa de residuos. Este sistema de recogida de lixiviado puede ser grava, arena o geored.

Si es necesario se puede utilizar un geotextil como filtro o protección. El geotextil filtro se coloca sobre el sistema de recogida de lixiviados, y el geotextil de protección sobre la geomembrana.

El sistema de impermeabilización doble consiste:

- *una barrera de protección primaria superior* formada por GCL y geomembrana
- *una barrera de protección secundaria inferior* formada por:
 1. una barrera geológica natural (terreno arcilloso),
 2. una barrera geológica artificial (arcilla compactada o GCL),
 3. un revestimiento artificial impermeable (geomembrana)
- *un sistema secundario de recogida y detección de fuga de lixiviado*, situado entre la barrera primaria y secundaria, formado por grava, arena o geored
- *un sistema primario de recogida de lixiviado* colocado sobre la barrera de protección primaria, formado por grava, arena o geored.

La barrera geológica natural está constituida por un suelo arcilloso, con unas condiciones en cuanto al valor de su coeficiente de permeabilidad y de espesor establecidas en:

- a) Vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; espesor ≥ 5 m
- b) Vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; espesor ≥ 1 m
- c) Vertederos para residuos inertes: $k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s; espesor ≥ 1 m

Cuando la barrera geológica natural no cumpla las condiciones anteriores, puede complementarse con una barrera geológica artificial, que consiste en una capa de arcilla compactada de espesor igual o mayor que 0.5 m. En aquellos casos en que la colocación de la arcilla es difícil, por ejemplo cuando las laderas de base del vertedero tienen pendientes superiores a 3H: 1V, se puede colocar GCL.

Si la capa de drenaje para la recogida de lixiviados (primaria) está compuesta de grava y arena debe tener un espesor igual o mayor que 0.5 m.

Llega un momento en la vida de cualquier vertedero en el que su capacidad se agota. Cuando esto ocurre es necesario cubrir los residuos con un sistema de protección llamado sellado o clausura. El sellado consta de cinco componentes a considerar:

- *Sistema de recogida de gases* (grava, arena, geotextil, geored o geocompuesto)
- *Capa de impermeabilización hidráulica/gas* (arcilla, GCL o geomembrana)
- *Capa de protección* (geotextil y geomembrana)
- *Sistema de recogida de las aguas pluviales* (gravas, geotextil, geored o geocompuesto)
- *Capa de cobertera de tierras*

La Figura 1.4 presenta las secciones de las distintas soluciones descritas anteriormente:

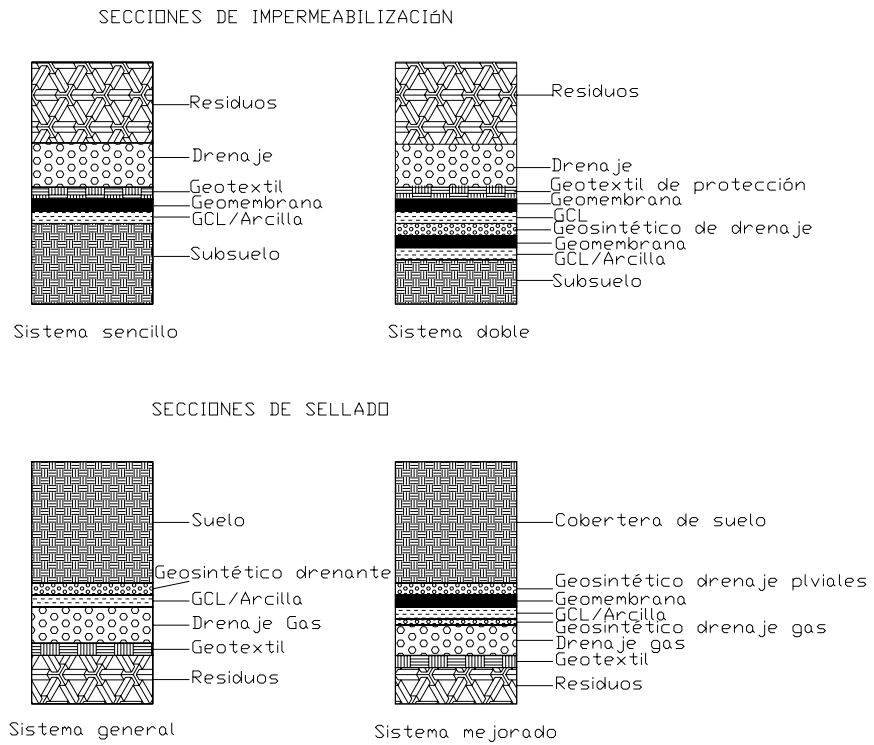


Figura 1.4 Secciones sistema impermeabilización y sellado de un vertedero de RSU



Figura 1.5 Colocación de láminas de GCL en la base de un vertedero



Figura 1.6 Colocación de geomembranas y geotextiles en la base de un vertedero

1.4 Estudio de la estabilidad de vertederos de residuos sólidos urbanos

En un principio, y atendiendo a las funciones que deben exigirse a un vertedero moderno, las cuales se han apuntado en el apartado 1.1, se considera que la mayor preocupación, en el diseño, construcción, llenado y post-clausura de un vertedero, se refiere a los problemas medioambientales que puede generar. Por lo que hay que evitar la contaminación atmosférica, de las aguas subterráneas y terrenos de su entorno.

Sin embargo, en las dos últimas décadas se han registrado graves problemas de inestabilidad en vertederos. En algunos casos, estas inestabilidades han movilizado enormes masas de residuos depositados, que aparte de generar gravísimos inconvenientes en la explotación y alteración del entorno, también han sido causantes de pérdida de vidas humanas.

A continuación se presentan algunos de los deslizamientos acaecidos que, por su entidad, han sido ampliamente divulgados en artículos técnicos y de prensa (José A. Barco, 2001):

Vertedero de Kettelmann Hills (California, marzo de 1988). La rotura sucedió a través del sistema multicapa de impermeabilización del vaso de vertedero durante el proceso de llenado, y fue estudiado por J. K. Mitchell et al. (1990).

Vertedero de Ümraniye (Estambul, abril de 1993). Su análisis se realizó por E. Güler y C. B. Avci (1995). El vertedero carecía de sistemas de extracción de gas y de drenaje de

lixiviado, siendo la causa principal de la rotura el exceso de presiones de líquido y gas. La superficie de rotura afectó a la masa de residuos.

Vertedero de Rumpke (Cincinnati, Ohio, marzo de 1996). Fue estudiado por Stark et al. (2000). El deslizamiento se produjo a través de una capa del terreno de cemento del vertedero, y movilizó 1.2 Hm³ de residuos sólidos.

Vertedero de Bens (La Coruña, septiembre de 1996). Tuvo repercusión en la prensa nacional. En el deslizamiento se movilaron 0.2 Hm³ de residuos que fueron a parar a la cala de O Portiño, contaminando el mar, y produciendo la muerte de una persona.

Relleno sanitario de Doña Juana (Colombia, septiembre de 1997). Analizado por H. Collazos (1998) y R. Espinace (2000). Parece que la rotura se produjo en la base del vertedero, a través de la interfaz entre la geomembrana lisa y la capa de arena que formaban parte del sistema de impermeabilización. La causa se achaca al incremento de presiones de gas y lixiviado, por deficiencias en el drenaje de los mismos. Se movilaron más de 750000 toneladas de material, bloqueándose el cauce de un río que discurría al pie.

Vertedero de Payatas (Manila, julio de 2000). Los vertidos, que alcanzaban 15 m de altura, se derrumbaron sobre un poblado de chabolas. El colapso se produjo como consecuencia de intensa lluvias sufridas durante cinco días. Murieron 160 personas sepultadas.

De las roturas comentadas puede deducirse que el tipo de inestabilidad es variable y depende de las características del terreno natural, de los materiales depositados, de la topografía y geometría del vertedero, así como de otros factores, como el drenaje de lixiviados y gases, forma de explotación, etc. La forma de rotura puede afectar sólo a los vertidos, o englobar también al cemento o a las capas de sellado..

R. A. Mitchell y J. K. Mitchell (1992) plantean distintos tipos de rotura de vertederos en las diversas fases del proceso (construcción, explotación y post-clausura).

1. *Deslizamiento del talud de base del vertedero*, Figura 1.9(a). Este tipo de rotura puede ocurrir en la fase de construcción, mientras se está excavando el depósito, y durante la colocación de las distintas capas que forman el sistema de impermeabilización, antes del comienzo de las operaciones de llenado. El diseño para prevenir este tipo de roturas se realiza con métodos convencionales de análisis de estabilidad de taludes.
2. *Deslizamiento a través de la masa de residuos*, Figura 1.9(b). Una situación geométrica determinada, altura y pendiente del talud, puede ser incompatible con el valor de la resistencia disponible en la masa del vertedero, por lo que se produce la rotura. El análisis de estabilidad en este caso se realiza por los métodos usuales de estabilidad de taludes. La mayor dificultad está en la determinación de los valores de los parámetros resistentes y de estado del residuo.

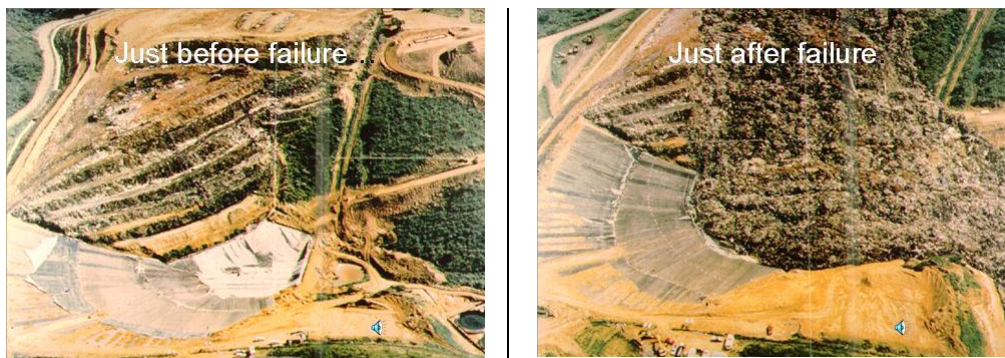


Figura 1.7 Rotura a través de la masa de residuo

3. *Deslizamiento a través del residuo y el cimiento*, Figura 1.9(c). Como se muestra en la figura, la altura del residuo sólido es excesiva, y la capacidad portante del suelo que forma el cimiento no es capaz de soportar la sobrecarga del vertedero. La posibilidad de este tipo de rotura será mayor cuando el terreno de cimentación sea poco competente, como en el caso de una arcilla blanda.
4. *Rotura a través de las capas de impermeabilización y sellado*, Figura 1.10. Cuando los sistemas de protección e impermeabilización, compuestos de suelo y geosintéticos se colocan sobre los taludes del vertedero, y la resistencia al corte

de alguna interfaz es inferior a la requerida para la estabilidad, se produce el deslizamiento a través de esta interfaz, a lo largo del talud.

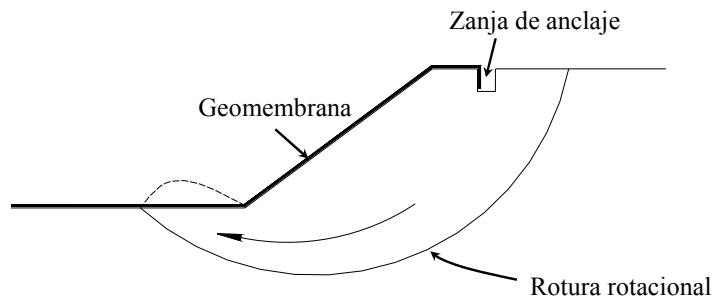
5. *Arrancamiento de las láminas del sistema de impermeabilización desde las zanjas de anclaje y deslizamientos hacia abajo del talud*, Figura 1.11(e). Para mejorar las condiciones de estabilidad frente a la rotura anterior (punto 4), pueden establecerse zanjas de anclaje, como viene representado en el esquema de la figura. Koerner (1990) estudió los métodos de análisis y diseño de las zanjas de anclaje, para proporcionar la suficiente resistencia frente al arrancamiento para impedir la rotura.



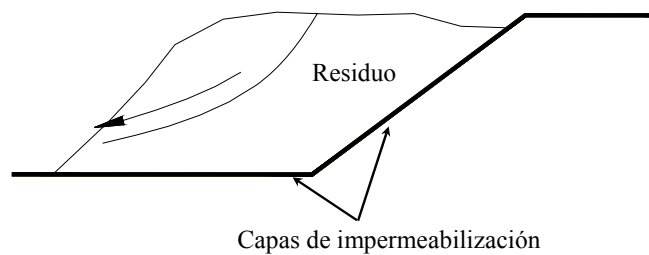
Figura 1.8 Deslizamiento a través de las láminas de impermeabilización

6. *Rotura a lo largo del sistema de impermeabilización*, Figura 1.11(f). La masa de residuo desliza en bloque siguiendo las interfaces con menor resistencia al deslizamiento, situadas en el interior del sistema de impermeabilización. La estabilidad frente a este tipo de rotura es controlada por las resistencias al corte entre las capas del sistema de impermeabilización, la geometría y el peso específico del residuo acumulado.
7. *Asientos excesivos*. Aunque estrictamente no es un tipo de inestabilidad, los asientos excesivos causados por la compresión y descomposición del residuo, y los asientos de los materiales de la cimentación, pueden dañar los colectores de lixiviados y gases del vertedero. Los asientos dentro del residuo pueden provocar la rotura de las capas de impermeabilización del talud basal. Además, los asientos

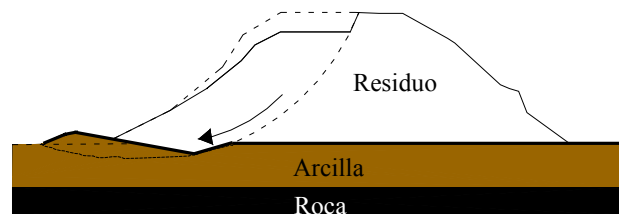
no uniformes pueden causar deflexiones que agrieten y rompan las láminas de impermeabilización y sellado, favoreciendo la entrada de agua en el interior del vertedero y afectando muy negativamente a su estabilidad.



a) Deslizamiento de la base del vertedero

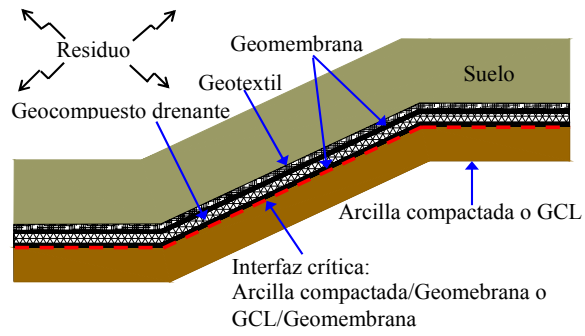


b) Rotura a través del residuo acumulado

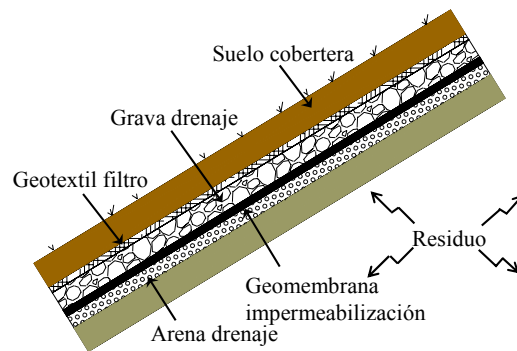


c) Rotura a través del residuo, capas de impermeabilización, y cemento

Figura 1.9 Inestabilidad a través del residuo

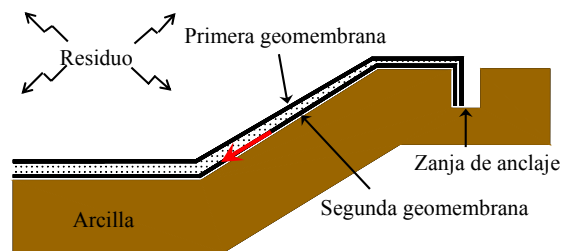


d1) Deslizamiento de las capas que forman el vaso del vertedero

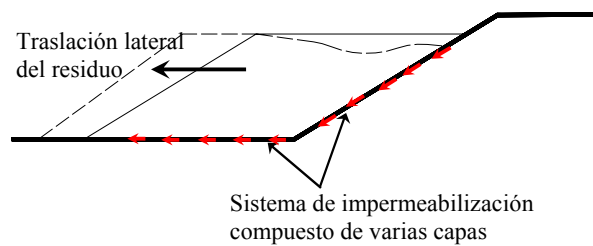


d2) Deslizamiento de las capas que forman el sellado del vertedero

Figura 1.10 Inestabilidad en sistemas de impermeabilización y sellado



e) Arrancamiento de las capas de impermeabilización de la zanja de anclaje y deslizamiento hacia abajo a lo largo del talud



f) Deslizamiento a lo largo del sistema de impermeabilización del vertedero

Figura 1.11 Inestabilidad dentro del sistema de impermeabilización

De lo comentado anteriormente se deduce la necesidad de que en el proyecto y en la explotación de un vertedero se aborde el estudio de su estabilidad. Los procedimientos deben ser similares a los utilizados en los análisis geotécnicos de estabilidad de taludes en suelos, contemplando los diversos mecanismos de rotura posibles. Por ello, hay que plantear un estudio del estado límite último en rotura y establecer valores de los coeficientes de seguridad que reduzcan la probabilidad de fallo a un límite aceptable.

Sin embargo, para este estudio se requiere conocer las características de los distintos materiales desde el punto de vista resistente. Es decir, hay que fijar para los materiales involucrados, y para sus contactos, unos criterios de rotura, que no deben ser sobrepasados por el estado tensional existente en el cuerpo y en el entorno del vertedero.

Desde que en el año 1773 Coulomb presentara su modelo de resistencia a corte de los suelos, éste ha sido ampliamente difundido y utilizado, tanto por su sencillez conceptual, como por la escasez de parámetros que lo definen. Al responder a una ecuación lineal entre la tensión normal y la tangencial al plano de rotura, dicho modelo sólo depende de dos parámetros: cohesión y ángulo de rozamiento. La extrapolación de este modelo a la relación entre tensiones principales es conocida como criterio de Mohr Coulomb.

Una ventaja adicional del modelo de Coulomb se encuentra en que la determinación de los valores de los parámetros, necesaria para poder ser aplicada en un análisis de estabilidad, requiere un número de ensayos pequeño, con aparatos y medios relativamente sencillos.

La bondad de la aplicación del criterio de rotura de Mohr-Coulomb está suficientemente contrastada en el caso de los suelos. No es así en el caso de los materiales que están involucrados en los vertederos.

Según indican H.L. Jessberger y R. Kockel (1993), los rellenos sanitarios poseen una gran deformabilidad, circunstancia que puede producir, aún en situaciones alejadas de la rotura de la masa de residuos, movimientos inadmisibles que afecten a los diversos sistemas del vertedero (drenaje, evacuación de gases, impermeabilización), por lo que, según dichos autores, sería más adecuado considerar situaciones de estado límite en servicio antes que de rotura.

En todo caso, si el estudio se plantea en esta última situación, hay que tener en cuenta que el residuo es muy heterogéneo y contiene elementos de gran tamaño. Estas características, junto con una gran deformabilidad y comportamiento temporal de los vertidos, establecen diferencias entre la respuesta resistente de un suelo y la que cabe esperar de un relleno sanitario. Sin embargo, dada la práctica imposibilidad de que, en el momento actual, pueda establecerse otro método alternativo de análisis, la extrapolación de los modelos y métodos de análisis de estabilidad geotécnicos utilizados en suelos tiene un uso extendido. En lo que concierne a la heterogeneidad y tamaño del material, el estudio de situaciones que consideren grandes masas de vertidos, situación normalmente contemplada en los análisis de estabilidad, tiene un “efecto escala” y reduce la influencia de dichas características en la globalidad del problema.

En el caso de las interfaces entre geosintéticos o entre geosintéticos y suelos, la existencia de fibras (p.e en los geotextiles) y rugosidades (p.e. en las geomembranas) produce imbricaciones entre ellos. De esta forma, al aumentar el valor de la tensión normal actuante, la tensión tangencial de rotura se incrementa de forma distinta a que lo que prevé la relación lineal establecida por el modelo de Coulomb. El ajuste lineal de los resultados obtenidos en ensayos de corte para un rango de tensiones normales establecido, puede mayorar o minorar la tensión tangencial fuera de dicho rango de tensiones, o incluso proporcionar valores negativos del parámetro cohesivo (denominada adhesión para el caso de geosintéticos), lo que no tiene sentido físico, y sólo es el resultado de la aplicación del modelo de Coulomb a un comportamiento más complejo.

1.5 Obtención de los parámetros resistentes al corte de los residuos

Los procedimientos especificados en la bibliografía para la determinación de la resistencia y obtención de los parámetros cohesión y ángulo de rozamiento son paralelos a los que se utilizan en la Mecánica de suelos, es decir: ensayos de laboratorio (triaxial y corte directo), ensayos “in situ”, y análisis “a posteriori” (Back-analysis).

Los ensayos de laboratorio tienen el problema de las pequeñas dimensiones de la muestra ensayada, incluso aunque se realicen con aparatos de corte directo de gran tamaño. Esto ha obligado, en algunos casos, a la trituración de la muestra. Por otra parte, la situación de rotura generalmente se alcanza para deformaciones elevadas, que

implican grandes movimientos, de todo punto inadmisibles, en casos reales. Esta circunstancia exige establecer valores más conservadores en el diseño.

Las limitaciones en cuanto a tamaño de la muestra pueden ser parcialmente solventadas con ensayos “in situ” de corte directo, placa de carga sobre la superficie del vertedero, y presiómetro, además de la prueba de penetración y métodos geofísicos.

Las pruebas de penetración presentan la ventaja de la sencillez de su uso y de su economía, por lo que han sido ampliamente utilizadas, tanto en investigación como en la aplicación práctica. De forma cualitativa pueden estimarse la variación de la resistencia a la penetración, pero no permiten la estimación directa de los parámetros resistentes. Por otra parte, son difícilmente extrapolables las correlaciones comúnmente utilizadas en suelos. De los resultados que se obtienen, Sánchez-Alciturri et al. (1993) deducen que el comportamiento de los residuos frente a estos ensayos se asemeja al de una arena floja con cierto contenido en finos limosos.

La utilización de métodos geofísicos tiene la ventaja de conseguir información de áreas extensas a bajo coste, pero de sus resultados no se deduce directamente el valor de los parámetros resistentes.

El uso de los análisis “a posteriori” está muy extendido en el campo geotécnico y es directamente extrapolable al estudio del comportamiento resistente de los vertederos. En la bibliografía se presentan tanto casos de rotura de taludes en rellenos sanitarios, como situaciones estables a las que se supone un determinado coeficiente de seguridad, función de los movimientos observados. En la interpretación de un caso real, asumiendo el criterio de Mohr-Coulomb, tan sólo se tiene una ecuación que corresponde a la condición de rotura. Por esta razón se obtiene una relación entre ambos parámetros, cohesión y ángulo de rozamiento, definida por una expresión analítica cuya pendiente es, generalmente, negativa. Hay que tener en cuenta que sólo un punto concreto de ella corresponde al verdadero valor de los parámetros, teniendo presente que los residuos, normalmente, se comportan como un material eminentemente friccional con una pequeña cohesión.

Con el fin de determinar un rango adecuado para el diseño, varios autores han recopilado resultados de los parámetros resistentes obtenidos en diversas investigaciones. Palma J. (1995) cita a Singh y Murphy (1990), Jessberger (1990), Oweiss y Khera (1990), Kavazanjian (1994), a los que cabe añadir Van Impe (1998). En

base a varias de las anteriores recopilaciones, Sánchez-Alciturri et al. (1993) proponen un rango de valores de los parámetros resistentes, que corresponde a la zona común entre los resultados de los ensayos de laboratorio y los proporcionados por análisis “a posteriori” de ensayos de campo o casos reales.

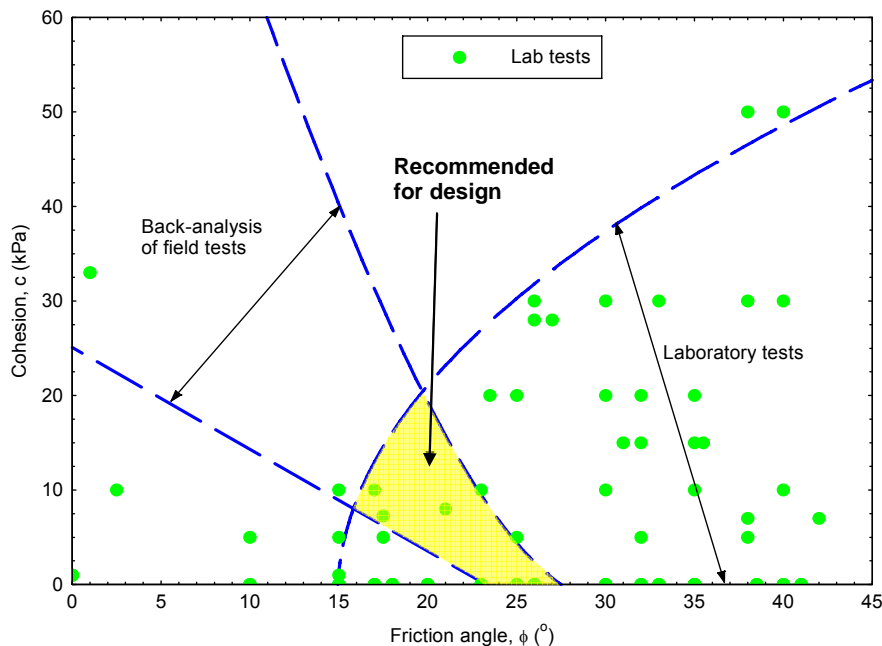


Figura 1.12 Parámetros recomendados para residuos. Sánchez et al. (1993)

1.6 Obtención de los parámetros resistentes al corte de las interfaces entre geosintéticos y entre suelo y geosintético

El conocimiento del comportamiento resistente de estas interfaces no sólo tiene como objeto el diseño de sistemas de impermeabilización de vertederos, sino que es de aplicación en cualquier situación en la que se utilicen materiales geosintéticos, como puede ser el caso de un suelo reforzado.

Para la obtención de los valores de los parámetros resistentes de los contactos entre geosintéticos y entre suelo y geosintético, existen diversas normas y procedimientos de ensayo tanto a nivel de investigación como de aplicación comercial. Estos han sido recopilados a partir de una revisión a fondo de la literatura científica y de las normativas existentes en la actualidad.

Los ensayos utilizados para obtener los parámetros friccionales se pueden agrupar en cuatro tipos:

- Ensayo de corte directo en caja de corte convencional
- Ensayo de corte con “*Pullout box*”
- Ensayo de plano inclinado
- Ensayo de corte anular

En el ensayo de corte directo convencional, se coloca la muestra dentro de una caja de corte, dividida en dos mitades. Se somete dicha muestra a una fuerza normal, y se aplica un desplazamiento relativo entre ambas mitades de la caja de forma que una sección de ésta se mueva con respecto a la otra sección. A medida que se va produciendo el desplazamiento relativo se movilizan tensiones tangenciales en el plano de corte. Durante el ensayo se registra la fuerza tangencial frente al desplazamiento horizontal de la mitad móvil de la caja. De dicha curva puede obtenerse el valor de la fuerza máximo o de rotura. El proceso de ensayo se refleja en el esquema de la Figura 1.13.

El ensayo se realiza para un mínimo de tres tensiones normales diferentes, dentro de un rango adecuado a las condiciones de campo. Para cada tensión normal aplicada, los valores de la tensión tangencial correspondientes son representados frente a la tensión normal. Utilizando generalmente el criterio de Mohr Coulomb, dichos resultados se ajustan mediante una recta de regresión cuyo ángulo de inclinación corresponde al ángulo de rozamiento entre los materiales ensayados, y su intersección con el eje de ordenadas proporciona el valor de la adhesión.

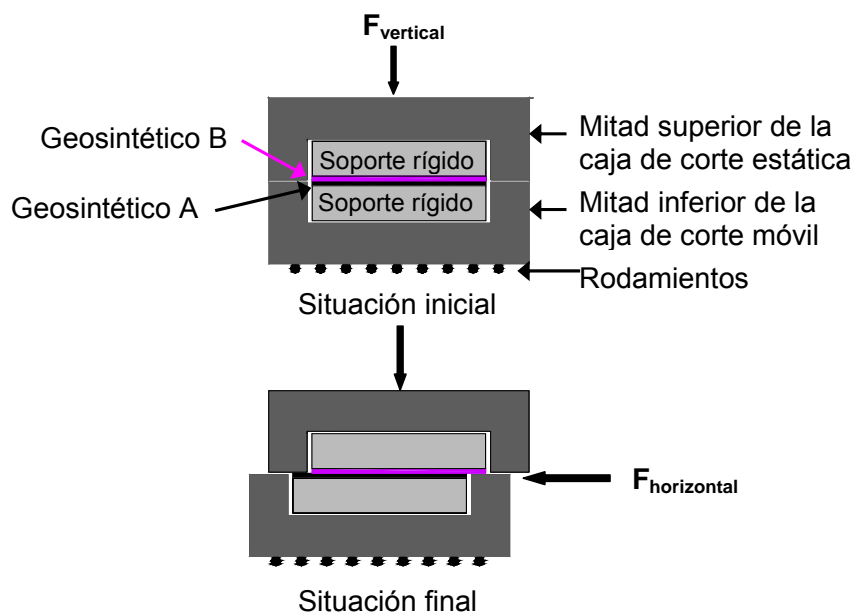


Figura 1.13 Esquema del ensayo de corte directo

Otra variedad de ensayo es el de corte de extracción, utilizando la caja "pullout box". El geosintético, en contacto con suelo u otro geosintético en el interior de la caja, es sometido a una fuerza de extracción, que se incrementa hasta que el geosintético empieza a deslizar, situación que se produce cuando se alcanza la máxima tensión tangencial en la interfaz. El esquema de este ensayo se refleja en la Figura 1.14, obteniendo la resistencia interna de una GCL, y en la Figura 1.15 para la interfaz entre dos geosintéticos.

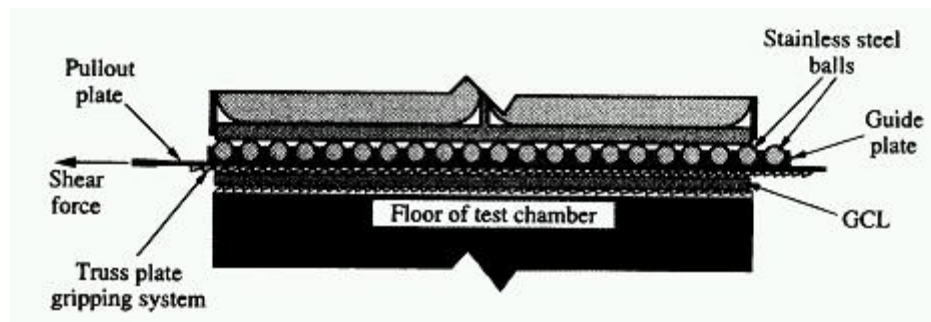


Figura 1.14 Pullout test, Fox et al. (1997)

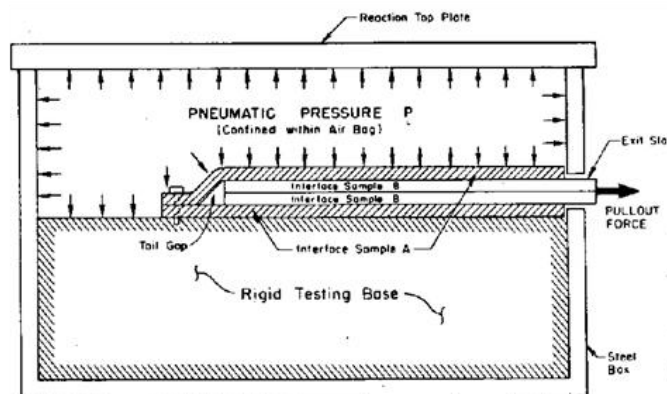


Figura 1.15 Esquema aparato de corte "Pullout box". Mitchell et al. (1990)

En cuanto al ensayo de plano inclinado, inicialmente se colocan los geosintéticos de forma que el contacto esté en posición horizontal. Durante el ensayo se eleva el plano de contacto, sólo por uno de sus lados, por lo que se produce un giro respecto de la arista contraria. El resultado del ensayo es el valor del ángulo necesario para que comience el deslizamiento en el contacto. Por las características de este ensayo, la tensión normal aplicada en las diversas investigaciones es de valor pequeño, inferior a 50 kPa. El esquema del ensayo de plano inclinado viene reflejado en la Figura 1.16:

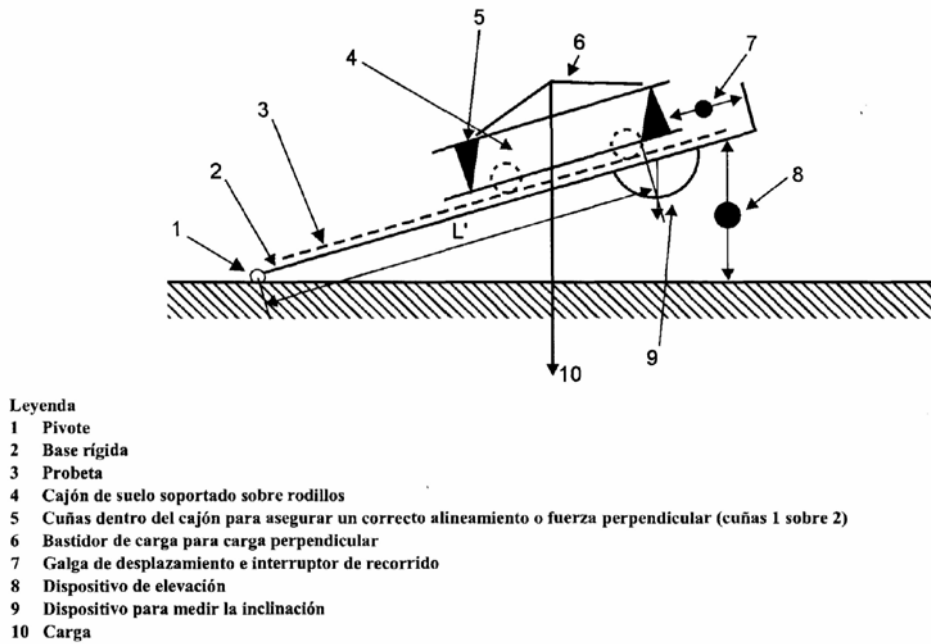


Figura 1.16 Esquema del ensayo de plano inclinado. UNE-EN ISO 12957-2

En el ensayo de corte anular, se utilizan muestras con forma de anillo, manteniendo el contacto en posición horizontal durante todo el ensayo, al igual que en el de corte directo. Se aplica una carga vertical y después se moviliza una de las caras a velocidad determinada y constante, mientras que la otra queda fija. La diferencia principal respecto al ensayo de corte directo estriba en que, mientras en aquél el desplazamiento se establece en una dirección, en el ensayo anular el desplazamiento es circular, girando la cara superior respecto la inferior, según el esquema que se muestra en la Figura 1.17. Además no está limitado el desplazamiento relativo en el contacto, pudiéndose alcanzar más fácilmente la resistencia residual.

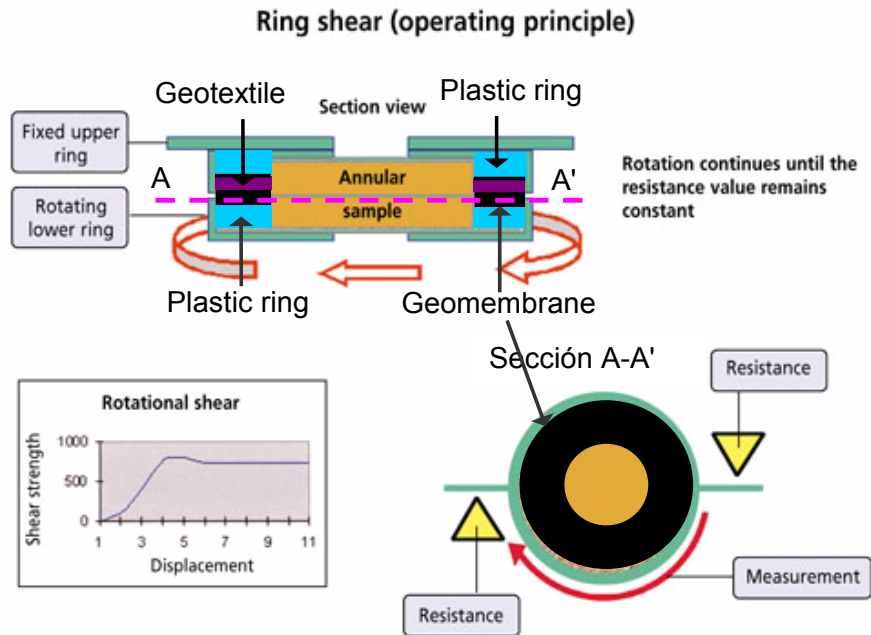


Figura 1.17 Esquema del ensayo de corte anular

Las normativas existentes, aplicables a algunos de estos ensayos se presentan a continuación.

Norma ASTM D5321-02, 2002. Esta norma describe el procedimiento a seguir para determinar los parámetros resistentes al corte entre suelo y geosintético o entre dos geosintéticos. Admite un amplio margen para que el usuario diseñe su propio aparato de corte directo, y su propio sistema de ensayo siempre que cumpla unas especificaciones establecidas.

Norma UNE-EN ISO 12957-1 (2005). Esta norma describe el procedimiento para determinar las parámetros resistentes al corte de geosintéticos en contacto con arena normalizada, es decir, con una granulometría, densidad y contenido de humedad específicos, bajo un esfuerzo normal y a una velocidad de desplazamiento constante, utilizando un aparato de corte directo. Con este ensayo se determina el ángulo de rozamiento en la interfaz arena/geosintético. Admite dos posibles formas de realización del ensayo, según las características de la caja:

- Caja de corte con superficie de contacto constante, es decir, el área de contacto entre la arena y el geosintético es constante durante todo el ensayo.
- Caja de corte de superficie de contacto variable, donde el área de contacto se va reduciendo a medida que se va produciendo el corte.

Existen varios aspectos importantes a considerar en esta norma. Por un lado, se tratan de ensayos-índice, debido a que se ensayan los diferentes tipos de geosintéticos con arena normalizada y con unos valores de presión normal específicos (50 kPa, 100 kPa, y 150 kPa). Por otro lado, únicamente anuncia con la siguiente frase: "Este procedimiento puede utilizarse para ensayar barreras geosintéticas", la posibilidad de realizar ensayos de corte directo entre dos geosintéticos, sin indicar los pasos concretos a seguir para la ejecución de estos tipos de ensayo.

Norma UNE-EN ISO 12957-2 (2005). Este documento describe un método para determinar las características de fricción de los geosintéticos, en contacto con suelo, bajo esfuerzos normales, utilizando un aparato de plano inclinado. Este ensayo puede realizarse con suelos obtenidos "in situ" o puede utilizarse también como un ensayo indicador con arena normalizada.

En la bibliografía consultada se ha encontrado gran cantidad de referencias a investigaciones realizadas para la obtención de los parámetros resistentes al corte entre geosintéticos y entre suelo y geosintético. Cada una utiliza una metodología y un aparato de corte diferente. En general, la información sobre la precisión y metodología de ensayos entre laboratorios es incompleta, circunstancia que es recogida en la norma ASTM. Esto da lugar a que no puedan realizarse comparaciones en sentido estricto entre los resultados de los ensayos obtenidos en distintos laboratorios.

Giroud et al. (1990). En esta investigación se realizaron ensayos de corte directo y de plano inclinado para obtener la resistencia al corte de la interfaz crítica: geomembrana/suelo, geored/geomembrana, y geotextil/geomembrana. Uno de las conclusiones más importante que se puede extraer de esta investigación es que el ensayo de plano inclinado es más apropiado para tensiones normales menores de 25 kPa, y a partir de este valor se puede emplear el aparato de corte directo convencional.

Koerner (1990). En el libro "*Designing with geosynthetics*", Koerner describe el procedimiento del ensayo de corte directo entre el suelo y los diferentes tipos de geosintéticos (geotextil, geomembrana, geomalla, geored y GCL), según la norma americana ASTM D5321-02, aunque discrepa de ella en cuanto al tamaño de la caja de corte. Koerner indica que la caja de corte puede ser cuadrada de 300 mm de lado para georedes, geomallas y geocompuestos, y de 100 mm para geotextiles, geomembranas y GCLs. La razón de utilizar dos tamaños de caja diferentes según se trate de unos

geosintéticos u otros, es que Koerner considera que el tamaño de la caja de corte indicado en la norma ASTM D5321 (300 mm x 300 mm) es excesivo, las muestras requieren mucho tiempo de saturación, las tensiones normales no son uniformes durante el corte, y el desplazamiento de la caja es insuficiente para alcanzar la tensión tangencial residual verdadera.

Mitchell et al. (1990). Este artículo muestra la investigación realizada para analizar cuales fueron las causas de la rotura del vertedero de residuos peligrosos Kettleman Hills, California, en 1988. Este estudio contiene un programa de ensayos para evaluar las propiedades resistentes al corte del sistema de impermeabilización del vertedero, y el análisis de su estabilidad en dos y tres dimensiones. Los ensayos de laboratorio para obtener los parámetros resistentes de las diferentes interfaces, geosintético/suelo y geosintético/geosintético, que formaban el sistema de impermeabilización fueron de dos tipos: ensayo de corte directo y ensayo de corte de extracción con "*Pullout box*". Al final de la campaña de ensayos, los autores comparan los resultados obtenidos con uno u otro método destacando las siguientes conclusiones:

- La ventaja del ensayo de corte directo es la sencillez y capacidad para ensayar numerosas combinaciones de interfaces en poco tiempo
- Las tensiones tangenciales residuales obtenidas en los dos tipos de ensayos son similares, lo que a juicio de los autores, añade confianza al uso exclusivo del ensayo de corte directo para la determinación de las tensiones tangenciales en las interfaces.

Koutsourais y Sprague (1991). El propósito de este estudio fue la de mejorar la información sobre los parámetros resistentes de las distintas interfaces entre geosintético y suelo y entre dos geosintéticos, empleando el ensayo de corte directo y el plano inclinado para comprobar los resultados. Con el ensayo de corte directo se realizaron ensayos multipunto, variando de forma discreta el valor de la tensión normal a lo largo del ensayo. Se abarcó un rango de tensiones normales de 20 a 62 kPa. Los ensayos de plano inclinado se realizaron con valores de la tensión normal en torno a 2.7 kPa. Algunas de las conclusiones más destacables son:

- Para valores bajos de la tensión normal, la dilatancia de los suelos en la interfaz mejora el rozamiento entre las capas.
- Para tensiones normales bajas, el comportamiento resistente de la interfaz entre geosintéticos y suelos granulares densos, presenta una envolvente de rotura curva.

- En el caso de interfaces que presentan valores nulos de adhesión los resultados obtenidos con los ensayos de corte directo y plano inclinado son similares.

Stark y Poeppel (1994). Esta investigación trata sobre la obtención de los parámetros resistentes al corte de la interfaz suelo/geosintético y geosintético/geosintético, a través del ensayo de corte anular. Los autores consideran que este aparato proporciona las siguientes ventajas:

- Obtención de los valores de la tensión tangencial residual debido al largo y continuo desplazamiento de corte.
- Se mantiene constante la sección transversal durante todo el ensayo.
- La carga no es excéntrica.

Y las desventajas son, por otra parte:

- El tamaño de las muestras es pequeño.
- Cambio de dirección de corte con respecto a la dirección de fabricación de los geosintéticos.

Gilbert et al. (1996). En este artículo se analiza la resistencia interna de GCL reforzadas y sin reforzar, la resistencia de las interfaces GCL/geomembrana y GCL/geocompuesto drenante. Se utilizó un aparato de corte directo 290x430 mm, un rango de tensiones normales de 3.45 a 345 kPa, el desplazamiento horizontal máximo de 43 mm, la velocidad de desplazamiento varía entre 0.05 y 0.5 mm/min, y el tiempo de hidratación entre 2 y 25 días. Los autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- La resistencia alcanzada a los 43 mm no representa el valor residual
- El plano de corte en el interior de la GCL se produce entre el geotextil tejido y la capa de bentonita
- En la interfaz GCL/geomembrana rugosa el plano de corte se produce en el interior de la GCL cuando la tensión normal es superior a 13.8 kPa
- En las interfaces GCL/geomembrana lisa y GCL/geocompuesto el plano de corte está localizado en la interfaz no en el interior de la GCL

Stark et al. (1996). Utilizando el anillo de corte usado por Stark y Poeppel (1994) estudian con detalle los parámetros que afectan a la resistencia al corte de la interfaz geomembrana/geotextil no tejido y geomembrana/geocompuesto drenante. Analizan la influencia en el valor de la resistencia, de la rugosidad de la geomembrana, del tipo de

fabricación, fibra, masa por unidad de área, composición de las fibras del geotextil, la velocidad de corte, etc.

Fox et al. (1997). Estos autores exponen en su artículo la investigación sobre el diseño y la evaluación del aparato de corte directo a gran escala para ensayar GCLs, al que denominan "*pullout shear machine*". La caja de corte tiene dimensiones de 1067 mm x 406 mm x 406 mm. Para realizar ensayos con GCLs, las muestras se colocan entre la placa corrediza (*pullout plate*) y el soporte inferior (*floor of test chamber*). Tanto la placa corrediza como el soporte están cubiertos con superficies de agarre denominadas "*truss plates*" (placas metálicas para unir elementos de madera) modificadas. Estas placas de agarre contienen agujeros, que permiten el drenaje de las muestras, y unos salientes con forma triangular que han sido recortados a una altura máxima de 2 mm. Una vez que las "*truss plates*" se han modificado se sujetan mediante tornillos al soporte inferior y a la placa corrediza, ver Figura 1.14. El sistema de corte consiste en tirar de la placa corrediza hacia adelante con una velocidad de desplazamiento constante. El máximo desplazamiento horizontal de la placa corrediza es 203 mm.

Izgin y Wasti (1998). Estos autores estudiaron los parámetros resistentes al corte de las interfaces geomembrana/arena a través del ensayo de corte directo con caja de pequeño tamaño (60x60 mm) y del ensayo de plano inclinado. El rango de tensiones normales aplicadas en el ensayo de corte directo fue de 14 a 200 kPa, mientras que el correspondiente a los ensayos de plano inclinado fue entre 5 y 50 kPa. Una de las principales conclusiones de este estudio es que la envolvente de rotura obtenida con el ensayo de corte directo es superior a la obtenida con el ensayo de plano inclinado, siendo ésta última una línea recta que pasa por el origen.

Jones y Dixon (1998). En este artículo se presentan los resultados de una serie de ensayos de laboratorio para investigar como influyen en diversos factores (composición polimérica, forma de fabricación, y metodología de ensayo) en los parámetros resistentes al corte entre geomembranas y geotextiles. Se realizaron dos tipos de ensayos: ensayo de corte directo y ensayo de corte anular. Los autores de esta investigación llegaron a las siguientes conclusiones:

- En el aparato de ensayo de corte directo se puede sustituir el suelo que cubre el geotextil, por un bloque de nylon. Pero con cierta precaución, debido a que cuando se ensayan geomembranas lisas, la tensión tangencial obtenida usando el bloque de

nylon es mayor que utilizando el suelo, y cuando se ensayan geomembranas rugosas, el uso de un soporte superior de nylon da valores menores que utilizando suelo.

- Los ensayos realizados con el aparato de corte anular dan tensiones tangenciales residuales más bajas que en los ensayos de corte directo. Esto es atribuido a varias causas. En primer lugar, una vez que el anillo gira 360° las fibras del geotextil se realinean a lo largo de las rugosidades de la geomembrana, y por otra parte, existen efectos de pulido y pérdida de fibras, siendo esto un caso extremo que probablemente no modela las condiciones de campo, donde la naturaleza aleatoria de las geomembranas rugosas facilita que las fibras se sigan enredando incluso después de grandes desplazamientos.

Wasti y Özdüzgün (2001). Estos autores presentan dos formas de obtener los parámetros resistentes al corte de la interfaz geomembrana/geotextil: mediante el ensayo de plano inclinado y ensayos de corte directo. Para ello utilizaron muestras de diferentes tamaños: 60x60 mm, 200x200 mm y 300x300 mm y así comparar resultados de los ensayos realizados con ambos métodos. De esta comparación, llegan a las conclusiones siguientes:

- La diferencia entre los resultados obtenidos del ensayo de corte directo con caja de tamaño pequeño (60 mm x 60 mm) y caja de tamaño grande (300 mm x 300 mm) no son significativas
- Proponen utilizar el ensayo de plano inclinado para niveles de tensión normal baja, y el ensayo de corte directo para niveles de tensión normal alta. La razón que esgrimen es que para tensiones normales bajas, la adhesión y el ángulo de rozamiento obtenido con los resultados del ensayo de corte directo resultan mayores que con el plano inclinado, por lo que los resultados proporcionados por este último método son más conservadores para el diseño.

Hebeler et al. (2005). Este artículo examina el papel que desempeñan las geomembranas rugosas en la interfaz geomembrana/geotextil, centrandó la atención en los mecanismos de interacción, mediante enganche y enredo de las fibras de geotextil con las rugosidades de la geomembrana. Se concluye que estos fenómenos, en la interfaz geomembrana rugosa/geotextil no tejido agujeteado, dependen de las características de la geomembrana rugosa y puede contribuir fuertemente en el valor de la resistencia al corte de pico.

Zornberg et al. (2005). Presentan los resultados de 414 ensayos de corte directo con caja cuadrada de 305 mm de lado, realizados durante 12 años, para obtener los parámetros resistentes al corte internos de las GCLs. Se han realizado ensayos con GCLs de características muy variadas, en un amplio rango de tensiones normales, velocidades de desplazamiento, y otros factores de la metodología del ensayo que, según consideran, originan variaciones en el valor de la tensión de corte.

1.7 Modelos de comportamiento de las discontinuidades

Las interfaces entre geosintéticos y entre suelo y geosintético constituyen contactos que pueden asimilarse, en cierto grado, a las discontinuidades rocosas, no sólo por su geometría planar y su respuesta frente a sollicitaciones normales y tangenciales, sino también por los mecanismos de interacción que se establecen entre las superficies de los geosintéticos en contacto, cuya influencia en el comportamiento resistente de la interfaz tiene connotaciones afines con las interacciones que se generan entre las rugosidades de las juntas de roca.

En este aspecto, en los resultados de los ensayos realizados durante este trabajo, se han encontrado semejanzas en el comportamiento resistente observado, respecto al que ofrecen las discontinuidades rocosas, tal como se expone en el capítulo 4. Por esta razón, a la hora de desarrollar un modelo de comportamiento de las interfaces, parece adecuado buscar apoyo en las teorías y modelos desarrollados en el campo de la mecánica de juntas de roca.

El motivo de este apartado es recopilar algunos de dichos modelos, estableciendo una clasificación entre los que establecen un criterio de plastificación frente a tensión cortante, y aquellos que estudian el comportamiento tensodeformacional, relacionando las tensiones actuantes con los desplazamientos generados.

Criterios de plastificación

Modelo de Patton (1966). Patton fue uno de los primeros investigadores en establecer un criterio de rotura entre tensiones τ y σ_n para juntas de roca rugosas. Su investigación se basó en el análisis de casos reales y ensayos de laboratorio. Para estos ensayos, con el fin de eliminar la variabilidad de las muestras, se fabricaron probetas dentadas de yeso con rugosidades de inclinación y altura uniformes. Se ensayaron

mediante corte directo, un gran número de probetas variando la inclinación y altura de dientes. De esta forma se comprobó que la rotura se producía según dos tipos de mecanismos:

1. Deslizamiento según la superficie dentada, produciéndose la consiguiente dilatación.
2. Rotura a través de la base de los dientes o rugosidades.

El primer mecanismo supone un deslizamiento según un plano inclinado un ángulo i respecto a la dirección de la tensión tangencial aplicada, con un ángulo de rozamiento básico entre superficies lisas ϕ_b . Esto implica que la expresión de la relación entre tensión normal y tangencial es lineal, pasa por el origen y tiene una pendiente igual a $\tan(\phi_b + i)$. En la segunda forma de rotura, siguiendo el criterio de rotura de Coulomb, resulta una expresión lineal, con un parámetro independiente, la resistencia cohesiva del material, y una pendiente igual a la tangente del ángulo de rozamiento interno. Como simplificación, dicho ángulo puede ser considerado el ángulo básico, ϕ_b .

Estableciendo ambos criterios se concluye que el primero de ellos sucederá para tensión normal baja, mientras que el segundo es más estricto para valores de tensión altos, presentándose un valor crítico de la tensión normal, σ_{cr} , que constituye la frontera entre ambos, Figura 1.18.

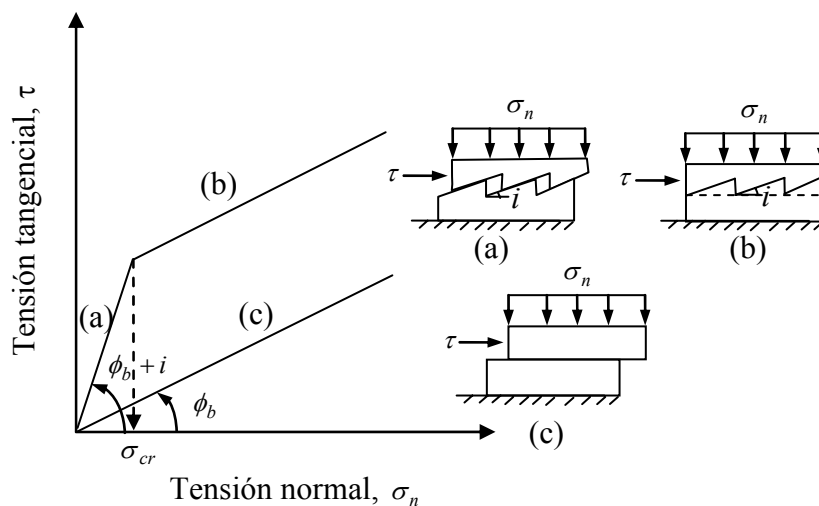


Figura 1.18 Envolventes y mecanismos de rotura muestras con superficies irregulares. Modelo de Patton (1966)

El criterio de plastificación, contemplando ambos mecanismos de rotura, responde a las siguientes ecuaciones:

- Resistencia de pico, τ_p :

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\phi_b + i) \quad \text{para} \quad \sigma_n \leq \sigma_{cr} \quad (1.1)$$

$$\tau_p = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\phi_b) \quad \text{para} \quad \sigma_n \geq \sigma_{cr} \quad (1.2)$$

- Resistencia residual, τ_r :

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\phi_b \quad (1.3)$$

siendo:

σ_n = tensión normal aplicada

ϕ_b = ángulo de rozamiento básico correspondiente a la resistencia al deslizamiento de superficies macroscópicamente lisas y planas.

i = ángulo de dilatación

c = cohesión de la roca matriz

De esta forma, Patton estableció una relación entre el comportamiento resistente de la discontinuidad y la geometría de las rugosidades, justificando la existencia de tensión tangencial de pico y su posterior reblandecimiento, así como la conducta dilatante de las discontinuidades. Por otra parte planteó un ajuste bilineal a la curvatura real de resistencia de pico, basado en sendos mecanismos de rotura.

Sin embargo en situaciones reales, las rugosidades de una discontinuidad no son uniformes, variando su geometría (inclinación, tamaño) e incluso la propia resistencia de la roca que las forma. Por esta razón, el valor de la tensión normal crítica no es igual para todas las rugosidades, sino que se presenta antes en las menos resistentes. De esta forma, a partir de un valor umbral de la tensión, correspondiente a la rugosidad de menor resistencia, se produce una rotura de tipo progresivo, que reduce la resistencia tangencial dada por el criterio de Patton y suaviza el quiebro de la ley bilineal.

Criterio de Barton (1973). Barton a partir de la revisión de una gran cantidad de resultados de ensayos sobre discontinuidades, realizados tanto por él como por otros investigadores como Patton, Jaeger, Byerlee, etc. Planteó un criterio empírico donde la resistencia tangencial es el producto de la tensión normal por la tangente del ángulo de pico, siendo éste suma del ángulo de rozamiento básico, ϕ_b , y del ángulo de dilatación de la discontinuidad. Dicho ángulo de dilatación no tiene un valor constante, salvo para

valores muy bajos de la tensión normal, se reduce al aumentar la tensión normal actuante.

Comprobó experimentalmente que se puede establecer una correlación lineal entre el ángulo de dilatación y el logaritmo de la relación entre la resistencia a compresión simple de la roca en las paredes de la junta y la tensión normal aplicada, $\log \frac{JCS}{\sigma_n}$. La pendiente de la recta de ajuste depende del tipo y grado de rugosidad que presente la discontinuidad.

Este criterio deja de tener validez cuando se alcanza la plastificación de las paredes de la junta, esto es, cuando la tensión normal actuante alcanza el valor de la resistencia a compresión simple. Para valores próximos a dicha resistencia el ángulo de dilatación tiende asintóticamente a cero lo que implica valores de pico cercanos a los residuales, Figura 1.19.

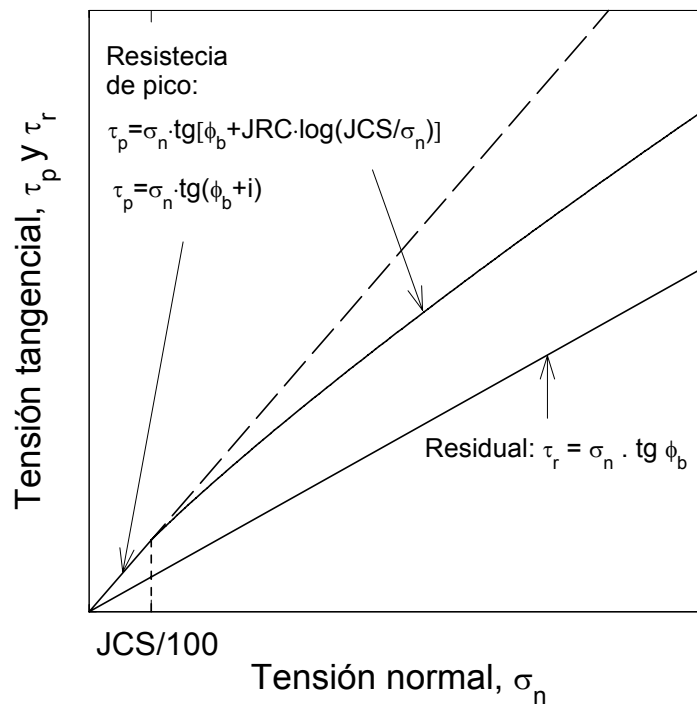


Figura 1.19 Criterio de Barton (1973) para planos de discontinuidad en rocas

Dicho criterio de rotura se define a través de las siguientes expresiones:

- Resistencia de pico, τ_p :

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi_b + i) \quad \text{para} \quad \frac{JCS}{\sigma_n} \geq 100 \quad (1.4)$$

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \text{tg} \left[\phi_b + JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad \text{para} \quad 1 \leq \frac{JCS}{\sigma_n} \leq 100 \quad (1.5)$$

- Resistencia residual, τ_r :

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \text{tg} \phi_b \quad (1.6)$$

siendo:

JRC = coeficiente de rugosidad (“Joint Roughness Coefficient”). Rango: 0-20

JCS = resistencia a compresión simple de las paredes de la junta (“Joint Compressive Strength”). Entre $\frac{1}{4}$ y 1 veces la resistencia a compresión simple de la roca matriz, σ_c .

La Figura 1.20 muestra las primeras clasificaciones y descripciones de juntas rugosas. Los coeficientes de rugosidad: 20, 10 y 5 para las clases A, B y C son puramente empíricos.

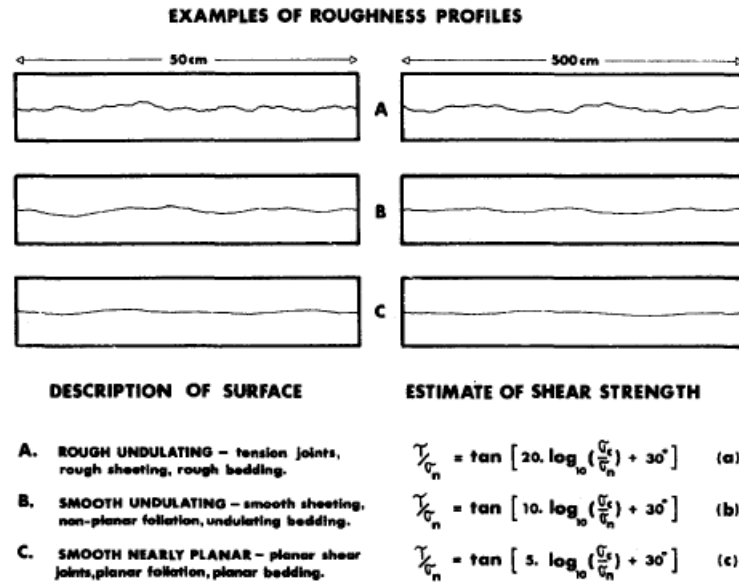


Figura 1.20 Primera clasificación y predicción de la resistencia al corte de tres tipos de juntas rugosas (Barton, 1973)

Modelo de Landanyi y Archambault (1970), propusieron calcular la resistencia al corte de las discontinuidades rocosas a través de una expresión analítica basada en consideraciones de tipo energético. Este modelo presenta una ley curva de la variación de la resistencia al corte con la tensión normal, a diferencia del modelo bilineal de Patton. La expresión de la resistencia al corte de la discontinuidad es la siguiente (Celemín M., 1987):

$$\tau_p = \frac{S}{A} = \frac{\sigma \cdot (\Delta v / \Delta u + \operatorname{tg} \phi_u) \cdot (1 - a_s) + a_s \cdot \tau_i}{1 - (1 - a_s) \cdot (\Delta v / \Delta u) \cdot \operatorname{tg} \phi_u} \quad (1.7)$$

donde S es la fuerza de corte, A el área de la discontinuidad, σ la tensión normal, $\Delta v / \Delta u$ la razón de dilatación, a_s representa el área de las irregularidades que han sido seccionadas en el proceso de corte, τ_i es la resistencia al corte de la roca sana, ϕ_u es el ángulo de resistencia al deslizamiento.

Criterio de Plesha (1987). Desarrolló un modelo teórico basado en el contacto en dos dimensiones, considerando que la rotura se produce por deslizamiento entre las paredes de las discontinuidad, generando una degradación superficial de éstas. Proponiendo que una ley constitutiva más realista para juntas de rocas considerando la geometría de rugosidad representada en la Figura 1.21. El primero muestra el modelo de Patton, Figura 1.21 (a) con una superficie en dientes de sierra que se degradan. El segundo, Figura 1.21 (b) es un modelo de superficie rugosa con dientes sinusoidales, en los cuales las irregularidades son idealizadas mediante series de funciones seno, que se degradan.

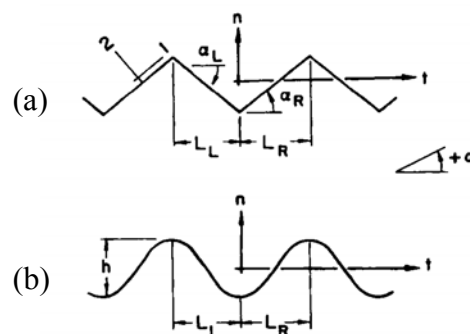


Figura 1.21 Idealización de una superficie de discontinuidad (Plesha, 1987)

Criterio de Grasselli y Egger (2003). Introducen el carácter tridimensional de la rugosidad mediante unos parámetros tridimensionales superficiales, A_0 , C , y θ_{\max}^* , en el criterio de la resistencia al corte. Establecen una expresión similar a la de Barton para la resistencia de pico.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r^* \left(1 + e^{-\left(\theta_{\max}^* / 9 A_0 C \right) (\sigma_n / \sigma_t)} \right) \quad (1.8)$$

donde τ_p es la tensión tangencial de pico de la junta, σ_n , tensión normal media aplicada, σ_t , es la resistencia a tracción del material intacto, ϕ_r^* es el ángulo de rozamiento residual medido después de un desplazamiento standard de 5 mm, θ_{\max}^* es el ángulo de buzamiento máximo con respecto a la dirección de corte, A_0 , es el área de contacto potencial máximo en la dirección de corte, y C es el parámetro de rugosidad.

Relaciones tensión-deformación

La deformación de las juntas puede describirse a través de las curvas tensión-deformación. Los términos rigidez normal (k_n) y rigidez a cortante (k_s) describen la variación de la tensión normal (σ_n) con respecto a los desplazamientos normales (V_j) y la tensión tangencial (τ) con respecto a los desplazamientos tangenciales (δ), respectivamente.

a) Relación tensión normal (σ_n) con desplazamiento normal (ΔV_j)

Shehata (1971) representó $\sigma_n - \Delta V_j$ en escala semilogarítmica, mostrando un ajuste lineal a bajas y altas tensiones normales, pero no en el rango de tensiones intermedio, como se observa en la Figura 1.22.

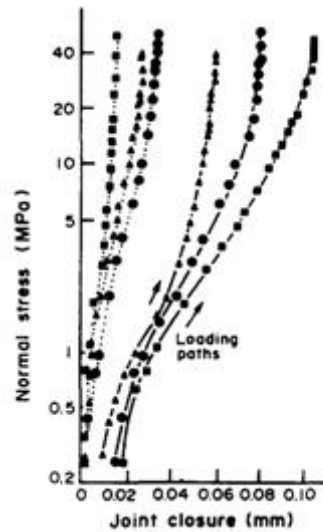


Figura 1.22 Gráfica $\log \sigma_n$ vs ΔV_j para diferentes tipos de juntas (Bandis et al., 1983)

Goodman (1974) propuso una función hiperbólica empírica a partir de las siguientes observaciones:

- El máximo cierre posible de la junta, V_m , debe ser menor que el espesor, e , de la junta, Figura 1.23(a).
- La resistencia a tracción de la junta es cero

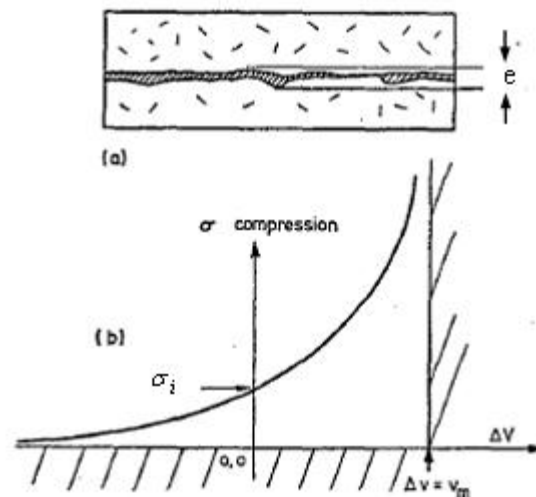


Figura 1.23 Compresión de una junta, σ_i es la tensión inicial de la junta

Con estas dos hipótesis se fija la relación entre la tensión normal, σ_n , y el desplazamiento, Figura 1.23(b), a través de la siguiente ecuación hiperbólica:

$$\Delta V_j = V_m - (V_m \cdot \sigma_i) \cdot \frac{1}{\sigma_n} \quad \text{para} \quad \sigma > \sigma_i \quad (1.9)$$

donde

ΔV_j = desplazamiento vertical para una σ_n dada

V_m = valor máximo de cierre de la junta

σ_i = nivel inicial de tensión o tensión de asentamiento

Bandis et al. (1983). Sugieren al siguiente expresión hiperbólica

$$\frac{\Delta V_j}{\sigma_n} = q - r\Delta V_j \quad \text{donde } q \text{ y } r \text{ son constantes} \quad (1.10)$$

La Figura 1.24 presenta la serie de puntos correspondiente a la junta de caliza. Se aprecia un buen ajuste de la expresión propuesta por Bandis para cualquier ciclo de carga y descarga, lo que implica que dicha ecuación no depende de la historia tensional ni del modo de carga.

Aunque teóricamente este criterio considera alcanzable un valor infinito para la tensión normal en la situación de máximo cierre de la junta, es lógico que su validez se encuentre limitada por el valor de la resistencia a compresión simple de la roca de las paredes de la discontinuidad. De lo anterior se desprende que la rigidez normal no es un valor constante, sino que varía, pudiendo establecerse una rigidez secante para un incremento de tensiones determinado o bien una rigidez tangente en el caso de incrementos diferenciales.

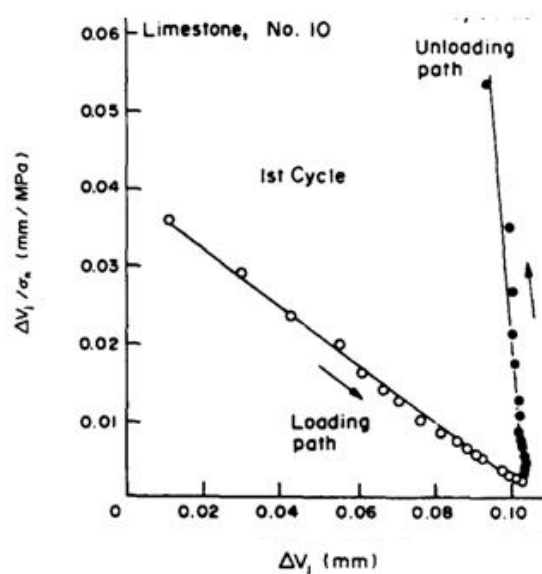


Figura 1.24 Gráficas lineales de $\Delta V_j/\sigma_n$ vs ΔV_j , junta de caliza, (Bandis et al., 1983)

b) *Relación tensión tangencial (τ) con desplazamiento tangencial(δ)*

Frecuentemente se usan funciones hiperbólicas para expresar analíticamente el comportamiento no lineal de las juntas sometidas a corte dentro del rango pre-pico. Así por ejemplo:

Kulhaway (1975) establece la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{\delta}{m + n\delta} \quad (1.11)$$

donde m y n son constantes.

Hungr and Coates (1978) presentaron una ecuación derivada de una relación definida por el límite elástico de las curvas $\tau - \delta$. Las formas básicas de sus funciones son:

$$\tau = \frac{u \cdot t}{t - \delta} - u, \text{ para } t < \delta \quad (1.12)$$

donde u y t son constantes.

Barton y Choubey (1977). La rigidez a cortante secante de pico es la relación entre la tensión tangencial de pico (τ_p) y el desplazamiento, δ_p , producido. La Figura 1.25 representa la variación de dicha rigidez con la tensión normal que obtuvieron estos autores. Las envolventes de la rigidez presentan formas curvas al igual que las envolventes de la resistencia tangencial de pico de las juntas. Estas gráficas también demuestran la dependencia de la rigidez a cortante de pico de la resistencia a compresión simple de las paredes de la junta (JCS) y de la rugosidad (JRC). Por lo tanto, Barton y Choubey sugirieron la siguiente relación empírica:

$$k_s = \frac{100}{L} \cdot \sigma_n \tan[JRC \log(JCS/\sigma_n) + \phi_r] \quad (1.13)$$

donde k_s = rigidez secante a cortante de pico

L = longitud de la junta

ϕ_r = ángulo de rozamiento residual

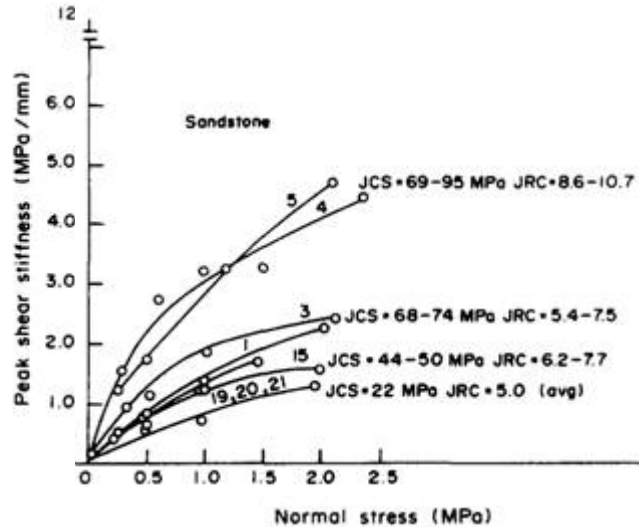


Figura 1.25 Variación de la rigidez a cortante de pico con la tensión normal de diferentes tipos de juntas (Bandis et al., 1983)

Criterio de Amadei et al. (1998). Se analizaron los resultados de experimentos de corte directo cíclico bajo carga normal constante, proponiendo un nuevo modelo constitutivo, donde la relación tensión tangencial-desplazamiento pre-pico sigue una ley hiperbólica, mientras que el comportamiento post-pico se plantea mediante un reblandecimiento lineal hasta llega a la tensión tangencial residual.

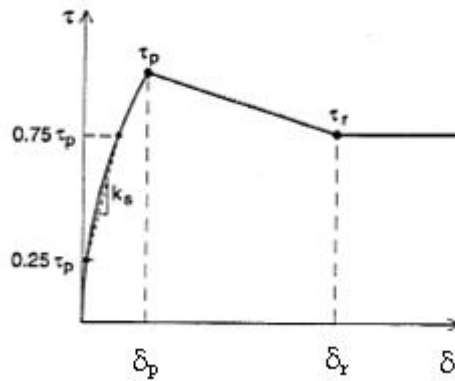


Figura 1.26 Curva idealizada tensión tangencial-desplazamiento. Amadei et al. (1998)

$$\tau = \frac{\delta}{\frac{\delta_p}{\tau_p} + B(\delta - \delta_p)} \quad \text{para } \delta < \delta_p \quad (1.14)$$

$$\tau = \left(\frac{\tau_p - \tau_r}{\delta_p - \delta_r} \right) \delta + \left(\frac{\tau_r \delta_p - \tau_p \delta_r}{\delta_p - \delta_r} \right) \quad \text{para } \delta_p \leq \delta \leq \delta_r \quad (1.15)$$

$$\tau = \tau_r \quad \text{para } \delta > \delta_r \quad (1.16)$$

siendo

$\delta_p =$ desplazamiento de pico dado por la ecuación empírica $\delta_p = a + b\sigma_n$ donde a y b son constantes del ajuste lineal

$\delta_r =$ desplazamiento residual

$\tau_p =$ tensión tangencial de pico definida por Landanyi y Archambault o por Barton

$\tau_r =$ tensión tangencial residual planteada por Goodman (1976)

$B =$ coeficiente constante

Grasselli y Egger (2003). Plantean una relación lineal entre la tensión y desplazamiento tangenciales previa a la rotura de pico, e hiperbólica con posterioridad:

$$u_p = u_m + \Delta u_p \quad (1.17)$$

donde u_m es el desplazamiento horizontal necesario para que se produzca el contacto en la junta.

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = 0, \quad 0 \leq u \leq u_m \quad (1.18)$$

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{1}{\Delta u_p} \frac{\tau_p}{\sigma_n} (u - u_m), \quad u_m \leq u \leq u_p \quad (1.19)$$

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{\tau_r}{\sigma_n} + \frac{\tau_p - \tau_r}{\sigma_n} \frac{u_p}{u} \quad u > u_p \quad (1.20)$$

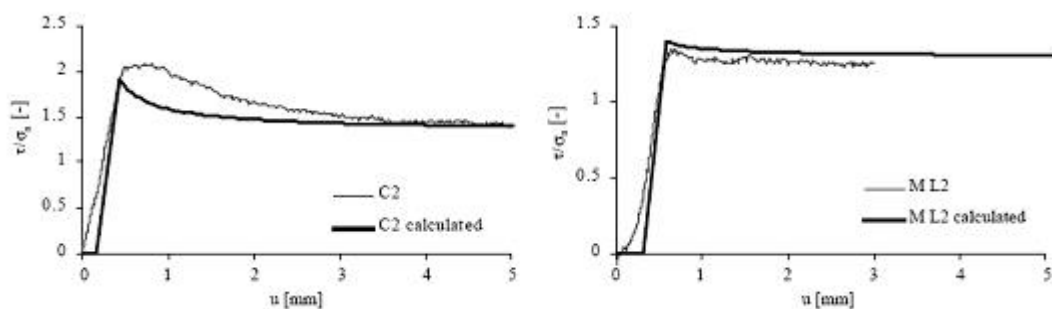


Figura 1.27 Comparación entre los resultados de experimentos de laboratorio y el modelo constitutivo propuesto, Grasselli y Egger (2003)

1.8 Consideraciones finales

En este capítulo se ha realizado una revisión bibliográfica de diversos aspectos relacionados con la investigación desarrollada y expuesta en este documento. Como resumen se puede establecer que:

- Se han contemplado diversos factores que influyen en la estabilidad de un vertedero de residuos sólidos urbanos, presentando los distintos tipos de rotura que se pueden producir y sus posibles causas, incidiendo en el hecho de que un diseño correcto de un vertedero y su posterior explotación exige el estudio de las características resistentes al corte, tanto de los residuos como de las interfaces de entre los geosintéticos que constituyen el sistema de impermeabilización de dichas instalaciones.
- Dicha exigencia implica la ejecución de ensayos para obtener las características resistentes. El criterio de plastificación comúnmente considerado en la bibliografía es el de Mohr Coulomb, que presenta la ventaja de su sencillez y dependencia de sólo dos parámetros: cohesión (o adhesión) y ángulo de rozamiento.
- Se ha realizado una revisión somera de los resultados de investigaciones sobre el comportamiento resistente de los residuos sólidos urbanos, presentando valores de los parámetros resistentes obtenidos a partir de ensayos de laboratorio y campo, así como análisis “a posteriori”.
- Posteriormente se han revisado los métodos de ensayo para la obtención de los parámetros resistentes de las interfaces entre geosintéticos y entre suelo y geosintético, como paso preliminar a la planificación y metodología de la campaña de ensayos realizada para esta investigación. De los diversos tipos utilizados –corte directo, ensayo de extracción (*Pullout box*), corte anular y plano inclinado– el primero de ellos es el más utilizado por su sencillez y facilidad de ejecución, habiendo sido el método utilizado en este trabajo.
- Aunque las normas e investigaciones consultadas coinciden en que los geosintéticos deben ser sujetados adecuadamente durante el ensayo, no existe unanimidad en la metodología de agarre, la cual afecta a los resultados, dificultando la comparación entre los procedentes de investigaciones o compañías de ensayo distintas.

- Entre la normativa existente se ha considerado la norma americana ASTM D5321-02 la más explícita y adecuada para los ensayos que se han realizado en la presente investigación, habiéndose tomado como base en el proceso seguido.
- Los resultados de los ensayos de corte directo sobre las interfaces entre geosintéticos, presentan similitudes con los que se obtienen en ensayos de corte directo en juntas de roca. Por esta razón y como base para el desarrollo del modelo teórico y numérico del comportamiento resistente de la interfaz geomembrana/geotextil, que se presenta en este documento, se han revisado diferentes modelos de comportamiento de discontinuidades rocosas.

2 Metodología del ensayo de corte directo para las interfaces geosintético/geosintético y suelo/geosintético

2.1 Introducción

La presente investigación forma parte de un amplio estudio que el Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria está desarrollando sobre el comportamiento friccional de los contactos entre diferentes tipos de geosintéticos y entre suelo y geosintéticos.

Con el fin de evaluar el comportamiento resistente al esfuerzo tangencial de los contactos se consideró como sistema más adecuado el procedimiento de corte directo. Para ello, se planteó la ejecución de los ensayos según los criterios de la Norma ASTM D 5321-02, que se consideró más ajustada a la situación estudiada. Sin embargo, en dicha norma no indica que tipo de métodos de sujeción de geosintéticos deben ser empleados, sino que expone unas características mínimas que deben ser cumplidas para que sea aceptable el resultado del ensayo. Además, hay diversos puntos de la metodología de ensayo que no están especificados en la norma ASTM: tiempo de hidratación, velocidad de desplazamiento, etc.. Esto exigió una revisión bibliográfica exhaustiva de los diversos sistemas y procedimientos metodológicos existentes, así como de los diversos métodos de sujeción de geosintéticos utilizados por diferentes investigadores, con el fin de implementarlos o adecuarlos al presente trabajo. Esta revisión bibliográfica se ha recogido en el apartado 1.6 del capítulo 1.

Para la ejecución de los ensayos se ha dispuesto de un aparato de corte directo, marca Wykeham Farrance International, con caja de corte cuadrada de 300 mm de lado, Figura 2.1. La carga vertical, de hasta 100 kN, se aplica hidráulicamente, permitiendo alcanzar tensiones normales de 1111 kPa sobre muestras de tamaño igual a la caja de corte. Los esfuerzos tangenciales sobre las muestras se aplican mediante un sistema mecánico (tornillo sin fin), que proporciona una velocidad horizontal constante, establecida digitalmente dentro del rango 0 a 10 mm/min. La fuerza tangencial y los desplazamientos horizontal y vertical que experimenta la muestra a lo largo del ensayo están controlados electrónicamente mediante anillos dinamométricos y transductores de desplazamiento tipo LVDT. Los datos resultantes se almacenan y procesan mediante un software de la empresa fabricante.

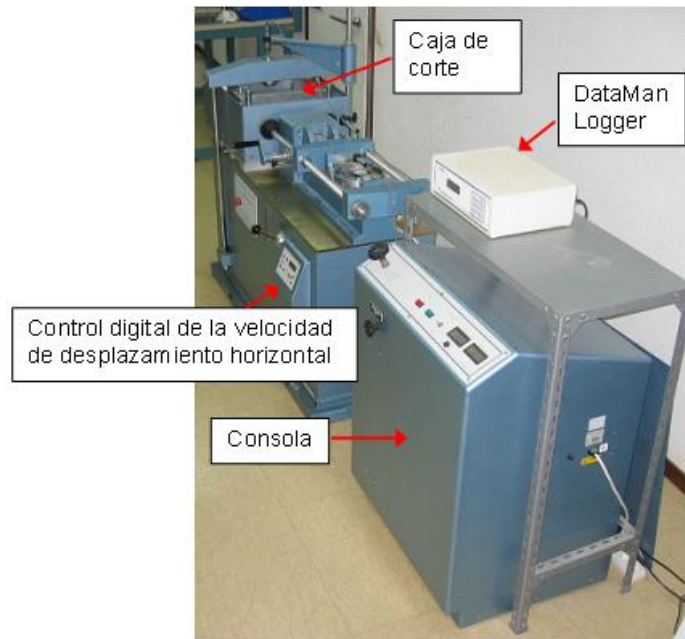


Figura 2.1 Aparato de corte directo utilizado

Originalmente la caja de corte que alberga la muestra, estaba diseñada para ejecutar ensayos con suelos, y no se ajustaba adecuadamente a las condiciones necesarias para la realización de ensayos entre geosintéticos.

Bajo estas condiciones iniciales, los primeros pasos de la investigación tuvieron como objetivos:

- Mejora y adecuación de la caja de corte para su uso con geosintéticos.
- Análisis de la bibliografía para recopilar los diversos procedimientos de ensayo y sistemas de sujeción de los geosintéticos a ensayar.
- Evaluación de dichos procedimientos y sistemas para determinar su idoneidad al fin buscado en la investigación.
- Desarrollo de la metodología de ensayo y sistemas de sujeción alternativos a los usados en investigaciones previas, y que supusieran una mejora de éstos.

2.2 Limitaciones y problemas encontrados en la aplicación de los métodos de sujeción de geosintéticos preexistentes

En la revisión de la bibliografía consultada se han encontrado diversos métodos de sujeción que se diferencian no sólo según el tipo de geosintético ensayado, sino que también difieren para un mismo tipo de geosintético. Esto ha obligado a realizar una evaluación previa de los diversos métodos para determinar su idoneidad tanto en la garantía de fijación como en la facilidad y economía de uso.

El procedimiento indicado en la Norma ASTM D5321-02 para ejecutar un ensayo entre dos geosintéticos, establece que el sistema de sujeción de dichos materiales debe ser suelo o una superficie rígida rugosa: por ejemplo el geosintético superior (B) está en contacto con suelo, y el inferior (A) sobre un soporte metálico y amordazado a él, Figura 2.2. La experiencia obtenida de las pruebas realizadas al comienzo de la presente investigación fue negativa. Al aplicar la fuerza de corte se producía sistemáticamente, desplazamiento, arrugado y plegado del geosintético superior, lo cual falseaba los resultados del ensayo.

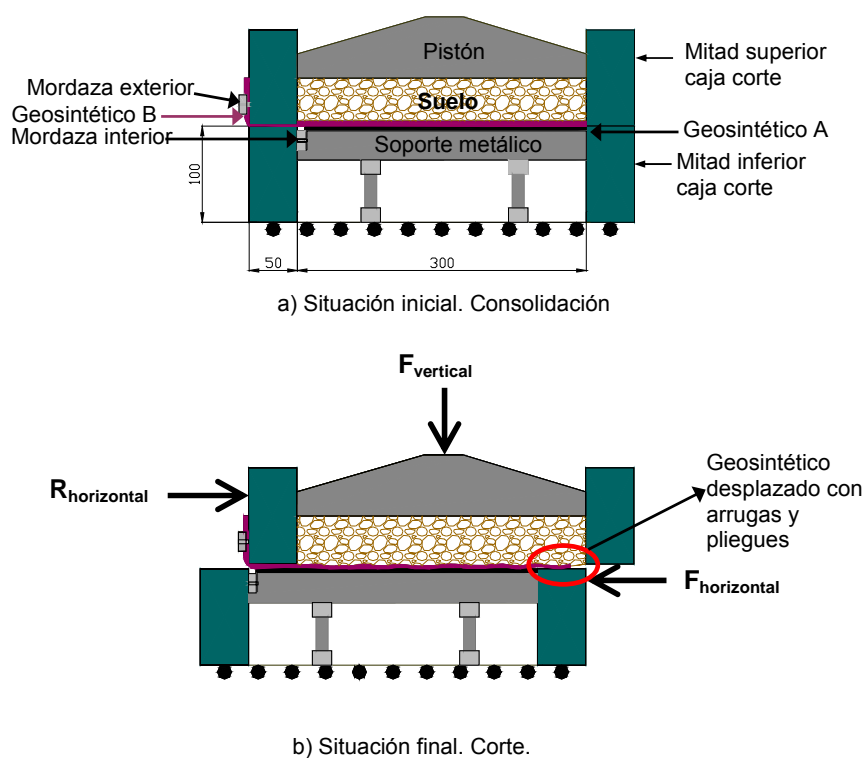


Figura 2.2 Esquema del ensayo de corte directo (ASTM D5321-02)

Otra alternativa de sujeción, propuesta por la Norma ISO 12957-1, es fijar el geosintético inferior (A) con papel de lija tipo P80. En la investigación se ha comprobado su validez, para ensayos de geotextiles, cuando el valor de la tensión normal es inferior a 100 kPa, pero no en situaciones en las que el valor se encuentra por encima de este rango. En estos casos se produce el deslizamiento entre el papel de lija y el soporte, y se observa que la lija queda impresa en el geosintético desplazándose conjuntamente, al ser menos resistente el contacto soporte-lija que la interfaz geotextil/lija. Esto conlleva el consiguiente desplazamiento y plegado del geosintético y

el falseamiento del resultado esperado. En la Figura 2.3 puede verse el movimiento que ha sufrido este sistema de sujeción durante la realización de un ensayo.

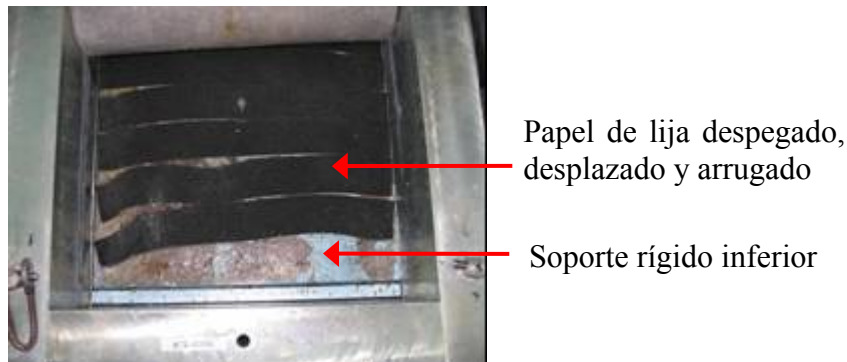


Figura 2.3 Método de sujeción con papel de lija. Aspecto después del ensayo

Otra opción de sujeción valorada fue el uso de las "*truss plates*" modificadas (placas metálicas de sujeción de elementos de madera) utilizadas por Fox et al. (1997). Este sistema se desechó porque los salientes de las placas son muy puntiagudos y afilados pudiendo causar daños al material a ensayar, traspasándolo y rompiéndolo. La alternativa de rebajar los salientes se desestimó por su dificultad y costo.



Figura 2.4 Método de sujeción "*truss plates*"

El uso de suelo compactado como sistema de fijación y soporte de un geosintético, establecido por las normas ASTM D 5321-02 e ISO 12957-1, fue también desechado, independientemente de su posible idoneidad para la inmovilización del geosintético durante el proceso del ensayo de corte. La razón es que requiere un proceso de colocación y compactación largo y trabajoso. Esto se consideró incompatible con el desarrollo de la investigación, la cual exigía la realización de un gran número de ensayos en un tiempo limitado.

Por otra parte, muchos de los autores consultados emplean pegamento resistente al agua o resina epoxi para sujetar los geosintéticos. Aunque se considera un buen sistema, presenta el problema de que el soporte sobre el que se pega es difícil de reutilizar por la dificultad de eliminar el pegamento.

2.3 Descripción y uso del nuevo sistema de sujeción de geosintéticos

2.3.1 Características

Para corregir y superar las limitaciones encontradas en el uso de los sistemas de sujeción expuestos anteriormente, se pensó en diseñar un nuevo sistema de sujeción que fuera aplicable al mayor número de geosintéticos posible.

Las ventajas que debía presentar este sistema de sujeción se pueden concretar en los siguientes puntos:

- Empleo del mismo método de sujeción para varios tipos de geosintéticos.
- Colocación y desmonte rápidos, y con la mayor sencillez posible.
- Eliminación de los problemas de deslizamiento, arrugue y pliegue del geosintético respecto al soporte.
- No producir daños en los geosintéticos a ensayar, como perforaciones, desgarros, etc.
- Posibilidad de sustitución del suelo como sistema de soporte, eliminando la necesidad de colocación y compactación del suelo, y consumiendo así menos tiempo en la preparación y ejecución de los ensayos.

2.3.2 Desarrollo

A partir de las premisas anteriormente enumeradas, basándose en la metodología de las investigaciones consultadas y en la experiencia propia, se concibió un nuevo sistema de sujeción. Éste consiste en una placa rugosa metálica que tiene las siguientes características:

- Presentar una superficie lo suficientemente rugosa que impida el deslizamiento del geosintético, manteniéndolo adecuadamente unido al soporte para todo el rango de tensiones de ensayo.

- Poseer unas rugosidades que no produzcan daños en el geosintético durante el ensayo.
- Permitir el paso del agua a su través, para posibilitar el drenaje y humectación del geosintético.

Estos objetivos se han conseguido diseñando la superficie rugosa representada en la Figura 2.5.

Se trata de una pieza de acero S235JR galvanizada rectangular, 299 mm x 284 mm x 10 mm, con 1680 dientes. Éstos, realizados mediante fresado, son de forma piramidal de base cuadrada de 1 mm de lado y altura 1 mm, y sobresalen de la cara superior de la pieza. La altura de los dientes está pensada para no desgarrar, ni perforar a los geosintéticos que se vayan a sujetar con la placa dentada. La cara inferior tiene 16 canales para favorecer el flujo de agua. A lo largo de estos canales se han practicado 210 perforaciones de 2 mm de diámetro para permitir el paso de agua a través de la placa.

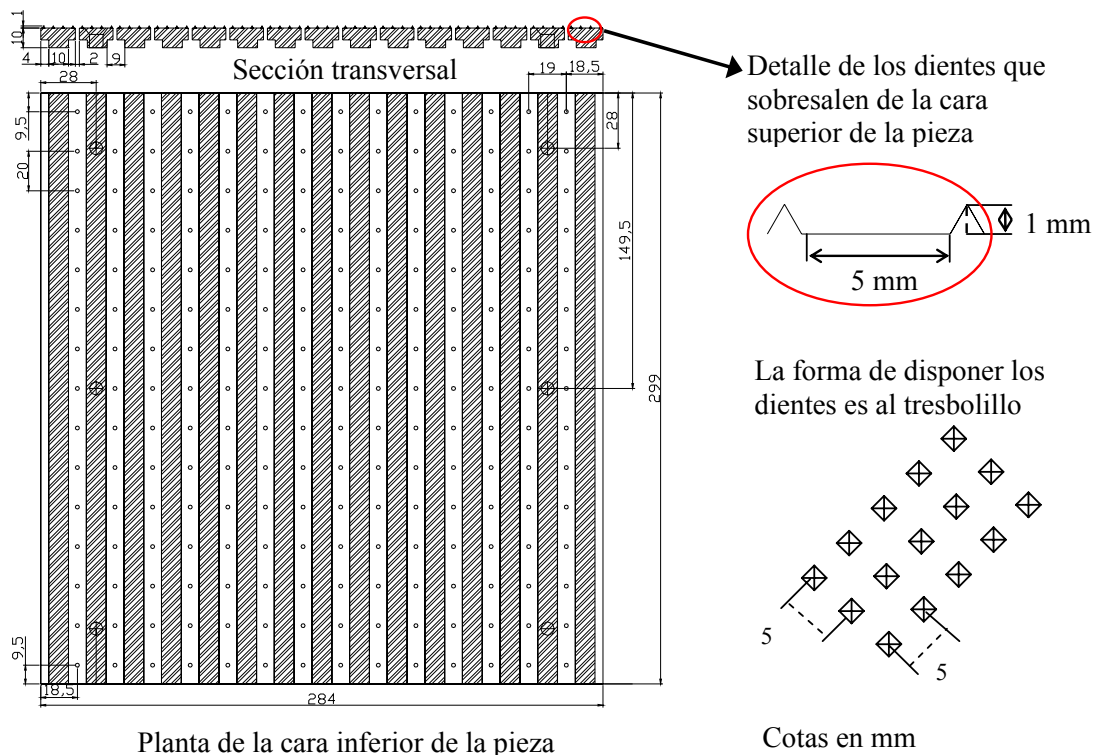
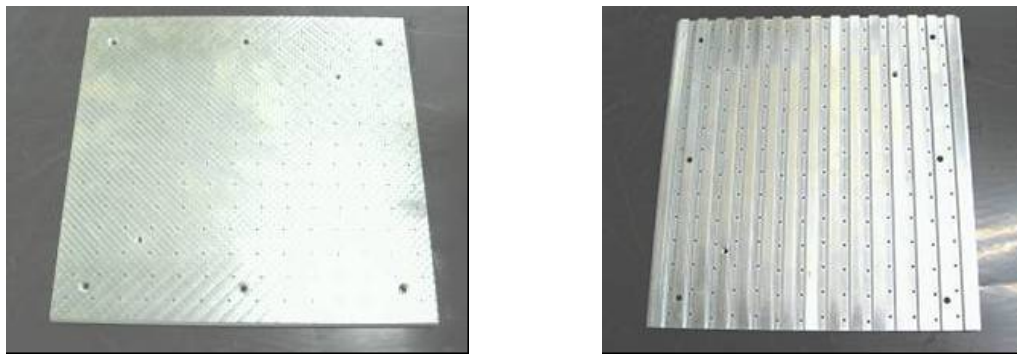


Figura 2.5 Descripción de la placa dentada

La placa metálica dentada va atornillada, en 6 puntos, a un soporte metálico rígido, del mismo tipo de acero galvanizado, diseñado según los planos de la Figura 2.7 . Este soporte dispone de una mordaza en uno de sus extremos para amarrar a los geosintéticos, colaborando en su sujeción, Figura 2.8.



a) Cara superior

b) Cara inferior

Figura 2.6 Placa metálica dentada

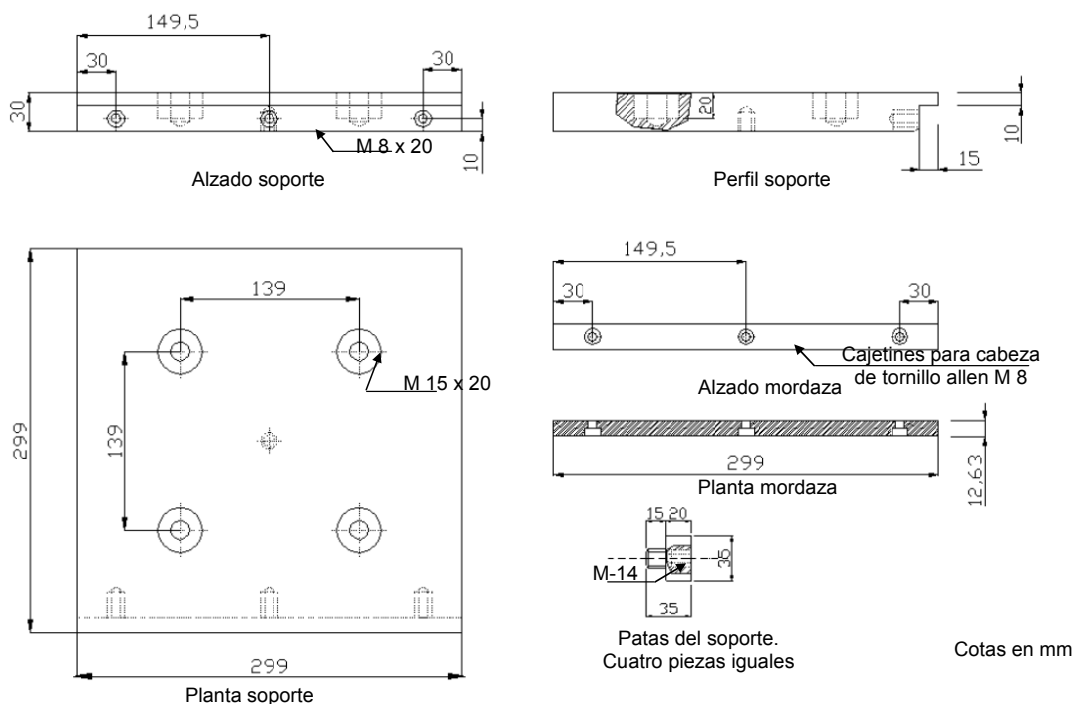


Figura 2.7 Descripción del soporte metálico



Figura 2.8 Piezas del soporte metálico

2.3.3 Utilización

La placa metálica dentada es adecuada para la sujeción de geomembranas, de Geosynthetic Clay Liner (GCL), de geotextiles de elevada masa por unidad de área, y de otros geocompuestos como los geocompuestos drenantes, en los que su espesor y resistencia al punzonamiento es suficiente para que los dientes de la placa no atraviesen, marquen y ondulen el geocompuesto.

En cambio, los geotextiles de masa por unidad de área media o pequeña pueden ser perforados por los dientes de la placa, por lo que se unen al soporte rígido mediante pegado.

En el caso de las geomallas, sus aberturas impiden el uso de la placa dentada, y por ello se fijan pegándolas al soporte rígido o utilizando un suelo.

El soporte metálico es adecuado para su empleo en cualquier tipo de ensayos entre dos geosintéticos, bien atornillado a la placa metálica dentada, o pegando los geotextiles y las geomallas sobre el mismo.

2.4 Sistemas de sujeción adoptados para los diversos geosintéticos

A continuación se presentan los métodos de sujeción establecidos para los diferentes geosintéticos:

- El geotextil de masa por unidad de área menor de 1000 gr/m^2 se pega con cinta de doble cara adhesiva a una chapa metálica galvanizada de 2 mm de espesor

que se atornilla al soporte metálico. El uso de la cinta de doble cara adhesiva permite su eliminación de forma fácil y así posibilita la reutilización de la placa galvanizada. Los geotextiles cuya masa por unidad de área es superior a los 1000 gr/m² pueden fijarse con la placa dentada, porque los salientes de ésta no traspasan el geotextil ni producen daños en la cara a ensayar.

- La geomembrana se une mediante tornillos a la placa dentada que va a su vez atornillada al soporte rígido. Si la geomembrana es lisa, o carece de rugosidades en la cara opuesta a la del ensayo, existe la posibilidad de fijarla con cinta de doble cara adhesiva a una placa galvanizada que se atornilla al soporte rígido.
- La GCL y el geocompuesto drenante se sujetan mediante la placa dentada colocada en la cara opuesta a la de ensayo. La placa dentada se atornilla al soporte rígido.
- La geomalla se fija, en general, con resina epoxi a una chapa metálica galvanizada, que va a su vez atornillada a un soporte rígido. Hay algunas situaciones en las que la sujeción de la geomalla se realiza con suelo compactado. Tal es el caso de ensayos de interfaces suelo/geomalla/geosintético o suelo/geomalla/suelo.

2.5 Metodología desarrollada para la realización del ensayo

2.5.1 Guía de ensayo

Al utilizarse como sistema de ensayo el corte directo, se ha seguido la metodología descrita en la norma ASTM D 5321-02, considerada de aplicación más diversa y específica que otras normativas. Dicha norma se ha completado con nuevas aportaciones deducidas de la investigación llevada a cabo. Esto ha dado lugar a una “guía de ensayo” que engloba los diversos puntos de la ASTM junto con recomendaciones aplicables a los ensayos entre geosintéticos y entre un suelo y un geosintético. Este documento se aporta en el apéndice A.

Las nuevas aportaciones e innovaciones respecto a la norma ASTM pueden resumirse en los siguientes puntos destacables:

- Definición y características de los aparatos o sistemas de sujeción de los geosintéticos: soporte rígido inferior y superior, placa metálica dentada, chapa metálica y cinta adhesiva de doble cara.

- Preparación de las probetas de geosintéticos para su ensayo, en cuanto al valor de sus dimensiones para facilitar el amarre y sujeción.
- Acondicionamiento de las probetas de los geosintéticos respecto a las condiciones de la fase de hidratación, previa al ensayo, y el tiempo requerido para completarla.
- Métodos de sujeción de los geosintéticos para impedir desplazamientos, dobleces o arrugas indeseadas durante el ensayo.
- Tiempo de consolidación y velocidad de desplazamiento durante la fase de rotura, para los diversos tipos de interfaces.
- Procedimientos de compactación del suelo para los ensayos de interfaz suelo/geosintético.

2.5.2 Compactación del suelo

La forma y dimensiones de la muestra de suelo a ensayar son muy distintas a las de un molde proctor, con un área de sección muy superior y escasa altura. Esta diferencia, unida a la dificultad, sino práctica imposibilidad, de utilización de las mazas compactadoras proctor en el interior del bastidor de la caja de corte, ha aconsejado el uso de la compactación estática mediante la aplicación de una carga vertical.

Una vez obtenido el valor de la densidad máxima y humedad óptima del suelo por el procedimiento normalizado (UNE 103-500-94 y UNE 103-501-94), se coloca una cantidad de suelo con su humedad óptima en el interior del bastidor y se aplica una carga vertical de valor suficientemente elevado para conseguir que, en un período de tiempo razonable, el suelo ocupe el volumen que corresponde a la densidad requerida.

Este sistema de compactación exige la aplicación de tensiones verticales elevadas, lo que conlleva un valor de la fuerza vertical excesivo si se mantiene la sección de muestra igual a la de la caja de corte. Por ello se ha optado por modificar las dimensiones del bastidor superior, donde se aloja la muestra de suelo, de forma que la sección de ensayo se reduzca a un cuadrado de 200 mm de lado. De esta forma se ha conseguido compactar a densidad proctor normal con la aplicación de la carga vertical proporcionada por la propia máquina de corte (100 kN). Cuando la densidad requerida es la correspondiente a la energía proctor modificado, el proceso de compactación se ha realizado externamente a la máquina en una prensa hidráulica capaz de alcanzar el valor de 300 kN de carga vertical.

2.5.3 Esquema de ensayo para las diferentes interfaces

De acuerdo a lo indicado en el apartado 2.4 respecto a los sistemas de sujeción de los diversos geosintéticos, se presentan a continuación, esquemáticamente, las disposiciones adoptadas para los distintos tipos de interfaz ensayados:

- Interfaz geosintético/geosintético:

Tipo 1: Un geosintético va sujeto con la placa dentada y el otro se pega con cinta de doble cara adhesiva y se amordazan si se trata de un geotextil o un geocompuesto, Figura 2.9. La geomalla va pegada con resina epoxi. Los tipos de interfaces a ensayar son:

geomembrana/geotextil
geocompuesto/geotextil
geocompuesto/geomalla

Tipo 2: Ambos geosintéticos se fijan con la placa dentada, Figura 2.10. La disposición es adecuada para ensayar:

geocompuesto/GCL
geocompuesto/geomembrana
GCL/geomembrana
GCL sola
geocompuesto solo

- Interfaz suelo/geosintético

Tipo 3: El geosintético se pega con doble cinta adhesiva, además de unirlo a la mordaza si se trata de un geotextil, Figura 2.11. Las interfaces a ensayar son:

suelo/geotextil
suelo/geomalla

Tipo 4: El geosintético se fija mediante la placa dentada y se amordaza si se trata de geocompuesto, Figura 2.12. Los tipos de interfaces que se ensayan son:

suelo/geomembrana
suelo/GCL
suelo/geocompuesto
suelo/geomalla/geocompuesto.

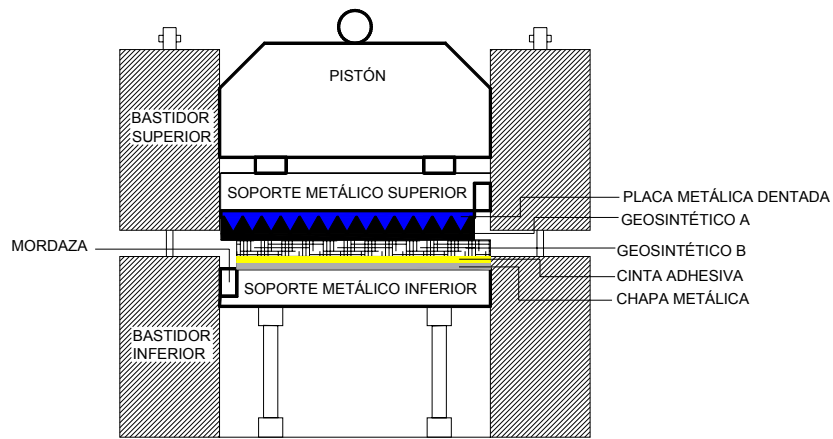


Figura 2.9 Esquema ensayo corte directo tipo 1

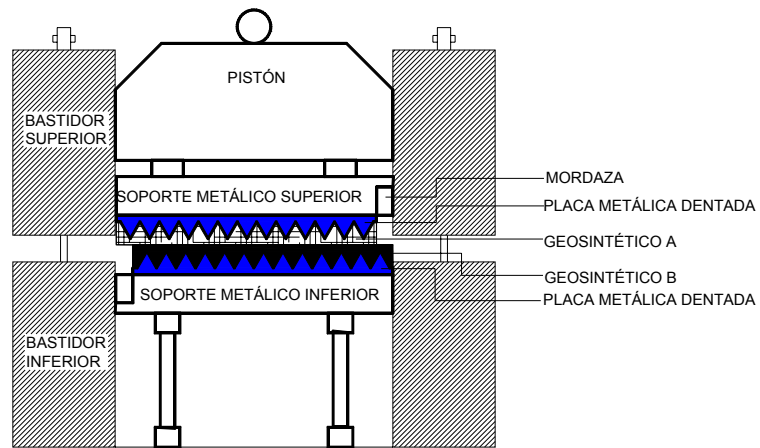


Figura 2.10 Esquema ensayo corte directo tipo 2

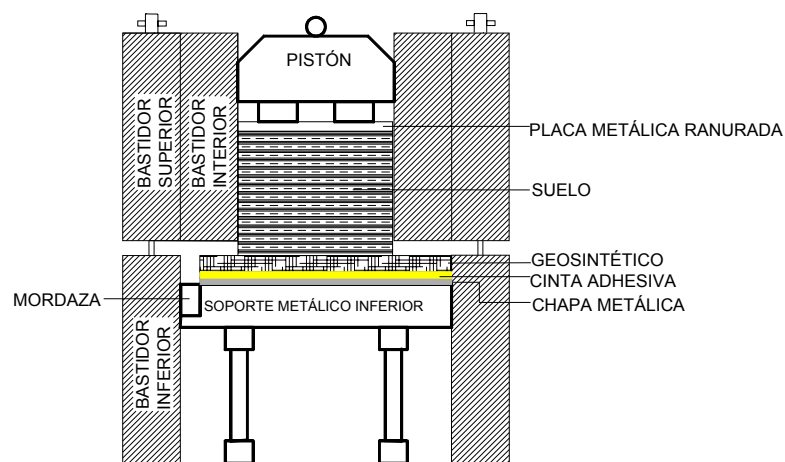


Figura 2.11 Esquema ensayo corte directo tipo 3

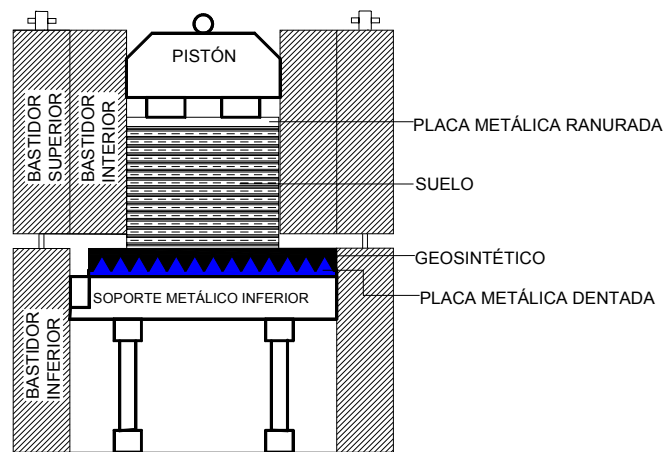


Figura 2.12 Esquema ensayo corte directo tipo 4

2.5.4 Condiciones de humedad del ensayo

Se establecen dos situaciones distintas en cuanto a las condiciones de humedad en las que se realiza el ensayo. Se denomina ensayo en condiciones húmedas si la interfaz se sumerge en agua, tanto en la fase de consolidación como de corte. Cuando la interfaz no está sumergida se denomina ensayo en condiciones secas, aun en el caso de que uno de los materiales a ensayar sea suelo con cierta humedad de compactación.

Si el ensayo se realiza en condiciones húmedas, determinados geosintéticos, como los geotextiles, GCL y geocompuestos, necesitan tiempo para que la absorción de agua se complete. Este proceso, denominado de hidratación, se realiza en el interior de un recipiente con agua antes de la colocación del geosintético en el aparato de corte. El tiempo de hidratación es, en principio, el necesario para alcanzar peso constante. En la presente investigación se ha comprobado que son suficientes 24 horas cuando se trata de geotextiles y geocompuestos y 48 horas en el caso de la GCL.

La consolidación es prácticamente inmediata para todos los geosintéticos, independientemente de las condiciones de humedad, salvo en el caso de la GCL. La capa de bentonita, aunque de pequeño espesor, requiere un cierto tiempo para que se disipen las presiones intersticiales generadas por la tensión normal aplicada. Se ha comprobado, que un periodo de 24 horas es suficiente para finalizar la fase de consolidación.

Salvo en la GCL, la velocidad de desplazamiento en la fase de corte, del ensayo en condiciones húmedas puede establecerse igual a la del ensayo en condiciones secas,

debido a la dispersión prácticamente inmediata de las presiones intersticiales generadas por las tensiones aplicadas.

En la Tabla 2.1 se presentan las condiciones de ensayo en cuanto a tiempos de hidratación, consolidación, así como velocidad de corte, en función del tipo de interfaz y estado de humedad.

Tabla 2.1 Condiciones de ensayo

Interfaz	thidra. (h)		tconsol. (min)		v (mm/min)	
	húmedo	seco	húmedo	seco	húmedo	seco
GT/GM	24/0	10	10	5	5	
GCL/GC	48/24	10	1440	5	0.01-1	
GCL/GM	48/0	10	1440	5	0.01-1	
GCL	48	10	1440	5	0.01-1	
GC/GMalla	24/0	10	10	5	5	
GC/GM	24/0	10	10	5	5	
GC	24	10	10	5	5	
Suelo/GT	0/24	10	10	1	1	
Suelo/GM	0/0	10	10	1	1	
Suelo/GMalla/GC	0/0/24	10	10	5	5	

donde

GT: geotextil

GM: geomembrana

GC: geocompuesto

GMalla: geomalla

GCL: Geosynthetic Clay Liner

thidra.: tiempo de hidratación dentro de la cámara húmeda

tconsol.: tiempo consolidación dentro de la máquina de corte

v: velocidad de desplazamiento horizontal

2.6 Interpretación del ensayo

El ensayo de corte directo de una interfaz geosintético/geosintético o suelo/geosintético es una adaptación del ensayo convencional de corte directo en suelos, ampliamente utilizado para la obtención de los parámetros resistentes del terreno. Como muestra la Figura 2.13(a), se fija el geosintético firmemente a una de las mitades de la caja del aparato de corte, y el suelo u otro geosintético a la otra mitad. Después de aplicar una tensión normal, se genera un desplazamiento relativo entre ambas mitades, desarrollándose tensiones tangenciales en el contacto. El valor de la tensión tangencial va aumentando con el desplazamiento horizontal hasta alcanzar el máximo. La tensión conseguida en este momento se considera la de rotura o pico, Figura 2.13(b). En algunos casos, si se continúa el ensayo aumentando el desplazamiento horizontal, la interfaz puede presentar un fenómeno de reblandecimiento, reduciéndose la tensión

tangencial hasta llegar a un valor que se mantiene aproximadamente constante, denominado tensión tangencial residual.

Adicionalmente, se pueden plantear otros valores intermedios como la tensión tangencial post-pico, valor de la tensión entre el de pico y el residual.

Los resultados del ensayo deben ajustarse mediante un modelo de comportamiento en rotura, el cual relaciona tensiones tangenciales y normales sobre la interfaz en situación de rotura. Esto exige repetir el ensayo, aplicando diferentes valores de tensión normal, para obtener los valores en rotura de la tensión tangencial, representar estos resultados en un diagrama τ - σ (plano de Mohr-Coulomb) y ajustar una línea de tendencia, tanto para los valores de pico como los residuales, Figura 2.13(c)

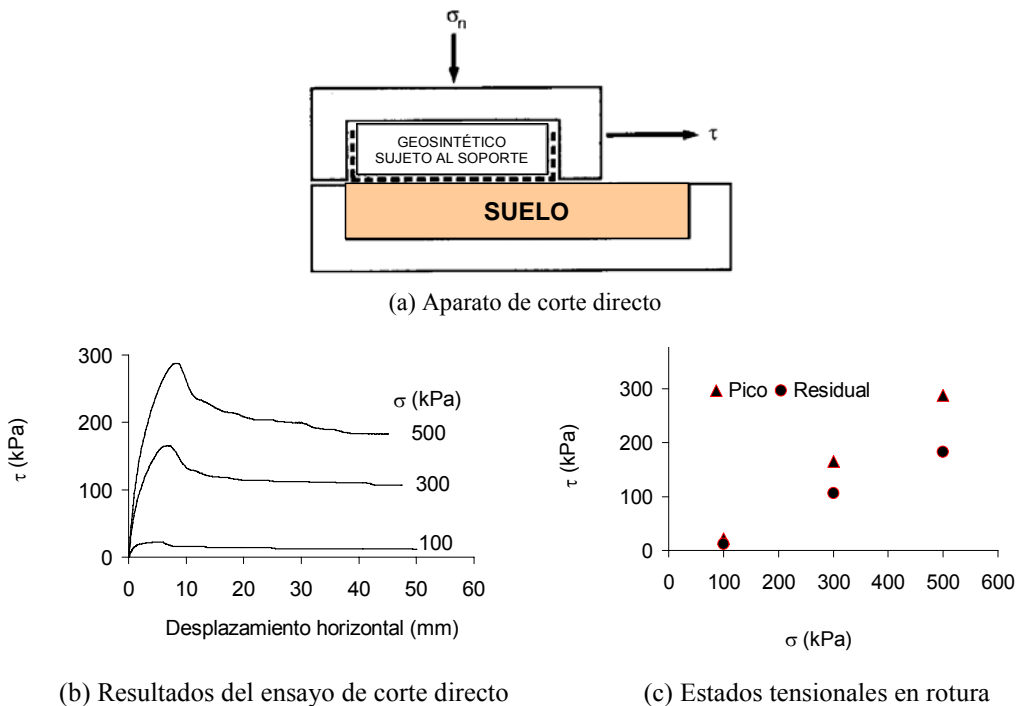


Figura 2.13 Esquema del ensayo y resultados obtenidos

2.6.1 Ajuste mediante el modelo de Coulomb

El modelo de Coulomb plantea una relación recta entre tensiones, de expresión:

$$\tau = c_a + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (2.1)$$

donde

τ = resistencia al deslizamiento (entre el geosintético y el suelo, o entre los dos geosintéticos)

σ_n = tensión normal en el plano de corte

c_a = adhesión (entre el geosintético y el suelo o entre dos geosintéticos)

ϕ = ángulo de rozamiento (entre el geosintético y el suelo, o entre los dos geosintéticos)

El comportamiento resistente que presenta la interfaz entre geosintéticos o entre éstos y suelo proporciona resultados que, en muchos casos, no se adecuan claramente a una envolvente recta. Sin embargo en la práctica se mantiene este criterio de rotura. Esto tiene una serie de connotaciones que a continuación se indican:

- Aun cuando el ajuste mediante el criterio de Coulomb sea aceptable en el rango de tensiones ensayado, no debe extrapolarse a dominios tensionales fuera de dicho rango.
- Si en el rango de tensiones de ensayo los resultados no se ajustan adecuadamente a una recta, pueden plantearse ajustes bilineales, que proporcionen parámetros c_a y ϕ variables de forma discreta y aporten ajustes apropiados a cada una de las subdivisiones, Figura 2.14.
- Conviene señalar que el ajuste con el modelo de Coulomb puede dar valores negativos del parámetro adhesión, o valores de la adhesión de pico inferiores a la residual. Ambas situaciones no tienen sentido físico y son, exclusivamente, consecuencia de las limitaciones del ajuste.

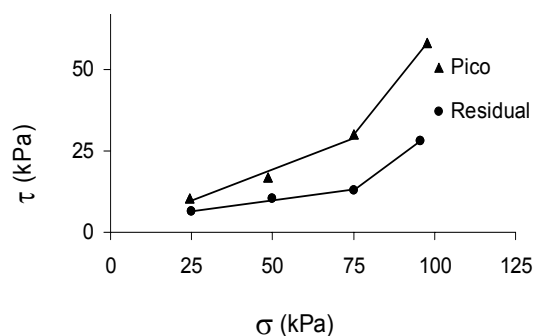


Figura 2.14 Envoltentes de rotura bilineales, interfaz geocompuesto/geomembrana

2.6.2 Otros posibles modelos de ajuste

Diversos investigadores (Giroud et al., 1993; Stark et al., 1996; Jones and Dixon, 1998; Fox et al., 1998; etc.), han reflejado el comportamiento resistente curvo de la interfaz geosintético/geosintético, proponiendo modelos de comportamiento más complejos que el de Coulomb.

Giroud et al. (1993) plantean la envolvente de resistencia de pico como una función tipo hiperbólico con asíntotas no ortogonales. La ecuación general es:

$$\tau = a_{\infty} + \sigma_n \tan \phi_{\infty} - \frac{a_{\infty} - a_o}{\left(1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_o}\right)^p} \quad (2.2)$$

donde a_{∞} , ϕ_{∞} , a_o , σ_o , y p son los parámetros del modelo a determinar mediante el ajuste.

Por otra parte, Jones y Dixon (1998) consideran un ajuste parabólico de ecuación:

$$\tau = a + b\sigma_n + c\sigma_n^2 \quad (2.3)$$

donde a , b , y c son los parámetros del modelo.

La Figura 2.15 muestra ejemplos de ambos ajustes a los resultados de un ensayo geotextil/geomembrana.

Estos autores, aun cuando desarrollan de manera cualitativa los mecanismos de interacción entre los geosintéticos durante el corte, han establecido los modelos de forma empírica, ajustando las curvas a los resultados obtenidos en ensayos.

Alternativamente, dentro del trabajo de investigación, se ha planteado un modelo de resistencia al corte que, además de mejorar el ajuste con el comportamiento observado en las interfaces entre geosintéticos, en su desarrollo se han cuantificado diversos fenómenos físicos de interacción entre las caras de la interfaz, tales como, imbricación, agarre, enredo, desgaste, etc.. Aunque el modelo se ha enfocado al comportamiento de la interfaz geotextil/geomembrana puede ser extrapolado en el futuro al estudio de otro tipo de interfaz. Esta parte del trabajo se expone en el capítulo 4.

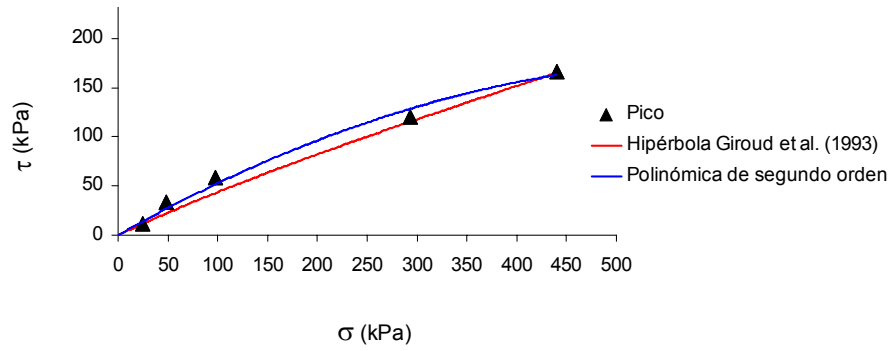


Figura 2.15 Envolventes de rotura curvas para una interfaz geotextil/geomembrana

3 Análisis de resultados de los ensayos de corte directo de las interfaces

3.1 Consideraciones generales

Siguiendo la metodología desarrollada en el capítulo 2, en esta sección se analiza el comportamiento resistente al corte observado, a partir de los resultados de los ensayos de corte directo de las siguientes interfaces:

- geomembrana/geotextil
- geomembrana/geocompuesto drenante
- geomembrana/suelo
- geotextil/suelo
- geomembrana/geosynthetic clay liner
- geocompuesto drenante/geosynthetic clay liner
- suelo/geomalla/geocompuesto drenante

En el momento de la redacción de este documento, se ha dispuesto, para las interfaces geomembrana/geotextil y geomembrana/geocompuesto drenante, de un número suficiente de ensayos para poder estudiar y valorar su comportamiento resistente. En cambio, con el resto de las interfaces, que aquí se presentan, el número de ensayos realizados ha sido menor, pues el objetivo principal en este caso ha sido el de comprobar el funcionamiento de la metodología desarrollada. Aunque el número de ensayos se considera escaso, también se ha analizado el comportamiento resistente de estas interfaces obteniendo unas conclusiones preliminares pendientes de un estudio más detallado y con mayor diversidad de geosintéticos.

Los ensayos se han realizado tanto en condiciones secas como húmedas. Como se ha comentado en el capítulo anterior, cuando los ensayos se ejecutan en estado húmedo, se requiere la hidratación de la muestra introduciéndola en un recipiente con agua durante un determinado período de tiempo, y mantener inundada la caja de corte a lo largo del ensayo. Así mismo, el tiempo de consolidación y la velocidad de ejecución del ensayo se diferencian, para algunos geosintéticos, según se consideren condiciones secas o húmedas. Tanto los tiempos de hidratación y consolidación como la velocidad de ensayo se muestran en la Tabla 2.1.

Para la interpretación de los resultados de los ensayos realizados, en general, se ha adoptado el criterio de rotura de Mohr Coulomb, obteniendo así los parámetros que define el modelo: la adhesión (c_a) y el ángulo de rozamiento (ϕ).

La mayoría de los ensayos presentan un comportamiento de reblandecimiento post-rotura, por lo que los valores representativos de la resistencia al deslizamiento son la tensión tangencial de rotura de pico, valor máximo alcanzado, y la tensión tangencial post-pico, cuyo valor se ha determinado como media de los valores de la tensión en los últimos 5 mm del rango de desplazamiento (hasta 50 mm).

Los parámetros del modelo de Coulomb se ajustan a ambos valores, proporcionando la adhesión y ángulo de rozamiento de pico y post-pico. En aquellos ensayos donde no se presentan fenómenos de reblandecimiento, alcanzándose una tensión máxima que se mantiene constante hasta el máximo desplazamiento, dicho valor es el representativo de la resistencia al deslizamiento.

Las características del aparato de ensayo y de las dimensiones de la caja de corte no permiten un desplazamiento relativo máximo superior a 50 mm. Este valor puede no ser suficiente para alcanzar la tensión residual de rotura de la interfaz. Así, Stark et al (1996), en ensayos realizados en aparato de corte anular de las interfaces geotextil/geomembrana rugosa, consideran necesario un rango entre 800 y 1150 mm de desplazamiento para conseguir la situación de rotura residual. De los resultados obtenidos llegan a la conclusión que el valor post-pico se considera igual al residual cuando la pérdida de resistencia post-pico esté entorno al 50-60%.

En base a lo anterior, en el caso de las interfaces que contengan geotextiles, si se obtienen valores de resistencia post-pico en el entorno de la reducción anterior, dichos valores podrán asumirse como valores de la resistencia residual de la interfaz.

La práctica totalidad de los ensayos realizados presentan dilatación negativa de escasa cuantía, cuyo valor máximo oscila entre 1/300 y 1/50 del desplazamiento horizontal máximo, con gran dispersión de resultados y en ocasiones con escasa concordancia con las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal. Por esta razón, no se ha considerado que dicho comportamiento contractante tuviera influencia en el comportamiento de las interfaces.

Con el fin de establecer una correspondencia entre la resistencia de pico alcanzada con la pérdida de resistencia post-pico, se define sensibilidad resistente de un contacto a la

relación entre la tensión tangencial de pico y post-pico, $\frac{\tau_{pico}}{\tau_{post-pico}}$ (Hebeler et al., 2005).

3.2 Materiales utilizados en el programa de ensayos de laboratorio

A continuación se enumeran y describen los materiales empleados en la presente investigación.

Las **geomembranas** utilizadas son materiales constituidos por polietileno de alta densidad (HDPE) y espesor de 1.5 mm. Se han ensayado cuatro tipos de geomembranas rugosas (GMr1, GMr2, GMr3, GMr4) y uno lisa (GMl). Cada uno de estas geomembranas rugosas corresponde a diferentes métodos usados en la actualidad para fabricar las rugosidades de las geomembranas: proyección de partículas de polietileno caliente sobre la superficie lisa de geomembrana, laminación mediante un esparcidor de polietileno líquido, estructuración, donde la geomembrana lisa caliente pasa a través de dos rodillos con la forma de la rugosidad y coextrusión con nitrógeno gas.

A la hora de realizar un análisis del comportamiento de los contactos conviene considerar dos clases de rugosidad atendiendo a su tamaño, macrotextura y microtextura, ambas representadas en la Figura 3.1. Se denomina macrotextura a los salientes de mayor altura relativa, y microtextura a las rugosidades presentes tanto en la capa base como en los relieves de la macrotextura, cuyo tamaño se encuentra entre 1/4 a 1/10 de la macrotextura.

La Tabla 3.1 presenta los tamaños de la macrotextura y métodos de fabricación de las geomembranas rugosas citadas anteriormente.

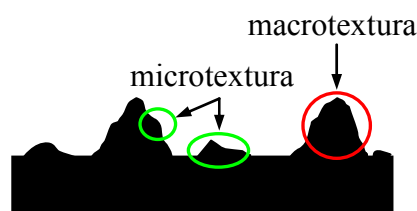


Figura 3.1 Rugosidad de la geomembrana

Tabla 3.1 Tipos de geomembranas ensayadas

Geomembrana	Método fabricación	Tamaño aproximado macrotextura (mm)
GMr1	proyección	0.5
GMr2_s1*	estructuración	1.2
GMr2_s2**	estructuración	0.7
GMr3	laminación	1.3
GMr4	coextrusión	0.25

* GMr2_s1 ensayada por la cara 1.

** GMr2_s2 ensayada por la cara 2

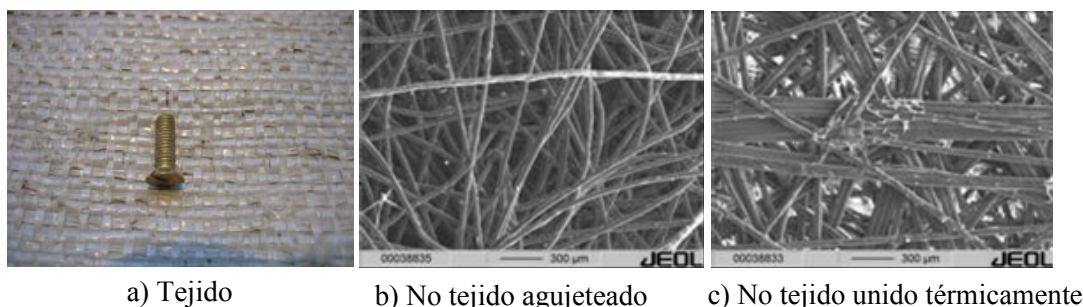
Las fibras de los **geotextiles** están elaboradas principalmente con polipropileno (PP), los tipos de fibras empleadas en la construcción de dichos geotextiles son monofilamentos o fibras cortas. El monofilamento es un filamento continuo entre 1000 y 9000 m, y las fibras cortas tienen una longitud entre 25 y 100 mm. Los métodos básicos de fabricación son el tejido y el no tejido, y dentro de los no tejidos se puede diferenciar entre agujeteado y unido térmicamente o termosoldado. Todos los geotextiles ensayados en esta investigación son no tejidos.

El agujeteado consiste en la unión mecánica de las fibras mediante el movimiento alterno de un gran número de agujas. Este proceso de fabricación da lugar a geotextiles con elevada masa por unidad de área y un espesor considerable.

La unión térmica de las fibras se consigue mediante la acción conjunta de calor y presión, resultando un geotextil con textura rígida, tacto áspero, peso bajo y alta resistencia.

La Figura 3.2 muestra fotografías, a escala real y microscópica, de varios tipos de geotextil. La Tabla 3.2 presenta algunas de las características de los geotextiles usados en el programa de ensayos.

En el geotextil se pueden distinguir dos partes: la matriz y las fibras superficiales, como se representan en la Figura 3.3.



a) Tejado

b) No tejido agujeteado

c) No tejido unido térmicamente

Figura 3.2 Fotografías de varios métodos de fabricación de geotextiles

Tabla 3.2 Características de los geotextiles ensayados

Geotextil	Material	Tipo fibra	Método fabricación	Masa por unidad área (g/m ²)
GT1	100%PP	monofilamento	agujeteado	500
GT2	100%PP	fibra corta	agujeteado	500
GT3	70%PP 30%PE	monofilamento	unión térmica	335
GT4	70%PP 30%PE	monofilamento	unión térmica	160
GT5	100%PP	fibra corta	agujeteado	150

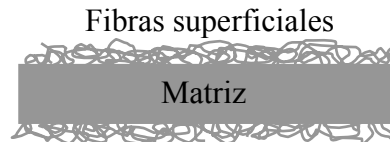


Figura 3.3 Esquema de la sección transversal de un geotextil agujeteado

Los **geocompuestos drenantes** consisten en un sándwich geotextil-geored-geotextil, Figura 3.4. La geored es una estructura reticular plana polimérica, formada por varillas unidas mediante nudos. Los geotextiles están termofijados a la geored. Las funciones de este tipo de geocompuesto son las de filtración del líquido o gas a través del geotextil y drenaje a través del hueco formado por la geored. La Tabla 3.3 muestra algunas características de los geocompuestos usados en el presente estudio.

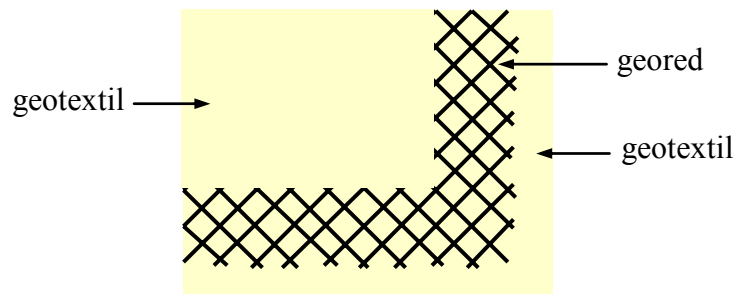


Figura 3.4 Geocompuesto drenante

Tabla 3.3 Características de los geocompuestos drenantes ensayados

Geocompuesto	Masa (g/m ²)	Espesor (mm)	Geored		Geotextiles	
			Material	Material	Método fabricación	Masa (g/m ²)
GC1	950	5	HDPE	PP	agujeteado	200-300
GC2	710	5	HDPE	PP	agujeteado	120-140
GC3	980	6	HDPE	PP	agujeteado	200-300

La **Geosynthetic Clay Liner** (GCL) ensayada consiste en una capa de bentonita sódica agujeteada de forma continua entre un geotextil tejido y un geotextil no tejido. La principal función de la GCL es la impermeabilización, debido a la capacidad absorbente de la bentonita. La Figura 3.5 muestra un esquema de la sección transversal de la GCL. La Tabla 3.4 muestra algunas de las características de la GCL utilizada.

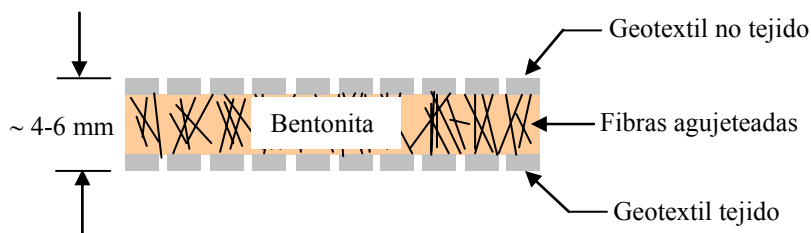


Figura 3.5 Esquema de la sección transversal de la GCL

Tabla 3.4 Características de la GCL ensayada

Geosintético	Masa (g/m ²)	Espesor (mm)	Bentonita	Geotextiles		
				Material	Método fabricación	Masa (g/m ²)
GCL	5000	6	sódica	PP	agujeteado/tejido	220-110

La **geomalla** es una red regular abierta de elementos resistentes a tracción integralmente conectados, cuyas uniones son formadas por extrusión, soldado o entrelazado. La geomalla puede ser uniaxial, biaxial o triaxial, como se puede observar en la Figura 3.6. Las geomallas empleadas en el programa de ensayos son biaxiales. La geomalla puede utilizarse en contacto con suelo, roca u otros geosintéticos, siendo su principal función el refuerzo.

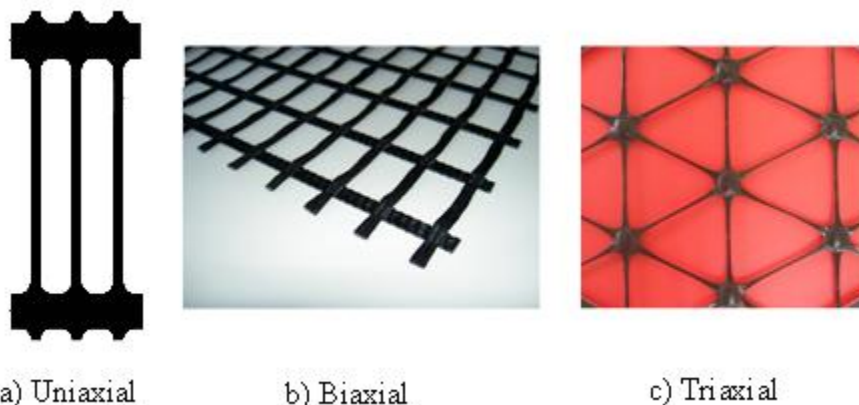


Figura 3.6 Tipos de geomallas

Tabla 3.5 Características de las geomallas ensayadas

Geomalla	Material	Tipo	Abertura de malla (mm)
Geomalla1	poliéster	biaxial	70x30
Geomalla2	poliéster flexible	biaxial	20x20

En los ensayos realizados se han utilizado dos tipos de suelo con las siguientes propiedades:

- Suelo1: Arcilla arenosa de plasticidad baja:
 - 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 - Límite líquido: 45.4%
 - Índice de plasticidad: 21.3%
 - Compactación: Proctor normal, densidad máxima seca 17.4 kN/m³, humedad óptima 17.50%. Proctor modificado, densidad máxima seca 19.2 kN/m³, humedad óptima 12%
- Suelo2: Arcilla arenosa de plasticidad baja:
 - 85% suelo fino y 15% suelo grueso
 - Límite líquido: 37%
 - Índice de plasticidad: 17%
 - Compactación: Proctor normal, densidad máxima seca 18.6 kN/m³, humedad óptima 13.2%. Proctor modificado, densidad máxima seca 20.6 kN/m³, humedad óptima 8.5%

3.3 Interfaz geomembrana/geotextil

La interfaz geomembrana/geotextil se utiliza tanto en base como en sellado de vertederos. La geomembrana tiene la función de impermeabilizar y el geotextil protege a la geomembrana para que no se produzcan daños en la misma.

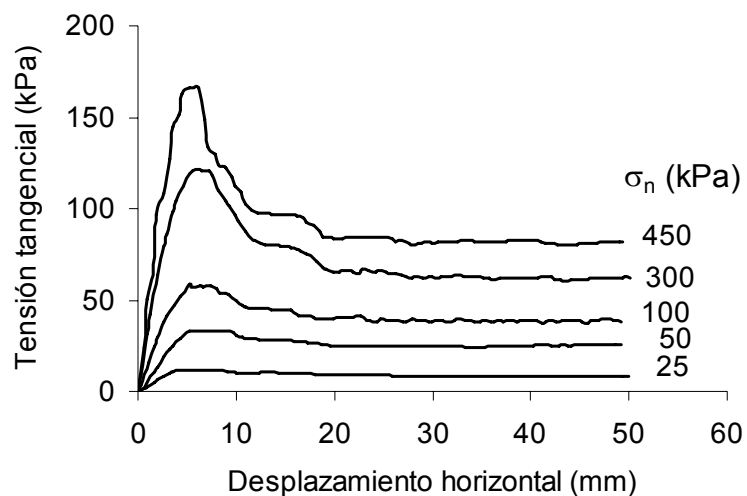
Se han realizado un total de 94 ensayos de corte directo con este tipo de interfaz, que vienen reflejados en la Tabla 3.6. El rango de tensiones normales aplicadas ha sido entre 25 y 450 kPa. En los ensayos realizados con geomembranas rugosas la tensión tangencial de pico normalmente se moviliza entre 3 y 10 mm y la resistencia post-pico es obtenida en torno a los 50 mm de desplazamiento horizontal.

Tabla 3.6 Ensayos interfaz geomembrana/geotextil

Interfaz	Condiciones de ensayo	
	seco	húmedo
GT1/GMr1	3	5
GT1/GMr2_s1	3	5
GT1/GMr2_s2		5
GT1/GMr3		5
GT1/GMr4		3
GT1/GM1		5
GT2/GMr1		4
GT2/GMr2_s1		5
GT2/GMr2_s2		4
GT2/GMr3		3
GT2/GMr4		4
GT2/GM1		5
GT3/GMr1	3	5
GT3/GMr2_s1	3	5
GT3/GMr2_s2		5
GT3/GMr3		5
GT3/GMr4		3
GT3/GM1		5

3.3.1 Comportamiento resistente al corte de la interfaz

Como representativo del comportamiento de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil se presenta en la Figura 3.7 la relación entre la tensión tangencial y el desplazamiento horizontal, obtenidas para las diversas tensiones normales aplicadas, en el caso concreto de los ensayos realizados con la interfaz GMr2_s1/GT1. Se observa la existencia de una tensión de pico que se moviliza para desplazamientos entre 4 y 8 mm. La tensión post-pico puede considerarse alcanzada para desplazamientos mayores de 30 mm.

**Figura 3.7** Comportamiento resistente de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil

Se observa que las curvas tienen una tendencia a presentar tensión de pico y post-pico tanto mayor cuanto más alto es el valor de la tensión normal aplicada. Este fenómeno no se observa en ensayos de corte realizados en suelo y parece tener una mayor relación con el comportamiento observado en juntas de roca.

La Figura 3.8 presenta las envolventes de rotura de pico y post-pico obtenidas para este mismo caso. Los resultados se pueden ajustar según una ley bilineal presentándose una tensión umbral en el entorno de 100 kPa. Las características de estas envolventes son:

- $\sigma_n \leq 100$ kPa: en este caso las envolventes de pico y post-pico pueden ser definidas por un ángulo de rozamiento de 31° y 23° , respectivamente, y una adhesión prácticamente nula en ambos casos. La pérdida de resistencia post-pico corresponde a una reducción del 26% en el ángulo de rozamiento.
- $100 < \sigma_n \leq 450$ kPa: el ángulo de rozamiento de pico es 18° , el ángulo de rozamiento post-pico 7° , y la adhesión 27 kPa en ambos casos. Esto supone una reducción del ángulo de rozamiento del 60% por lo que se podría considerar la resistencia tangencial post-pico como resistencia tangencial residual, como se ha indicado en el apartado 3.1.
- Comparando los ajustes realizados para los rangos de tensiones inferior y superior a la tensión umbral, se aprecia una disminución de la pendiente, para tensiones superiores a 100 kPa del orden de la mitad en la envolvente de resistencia de pico y de un tercio en la resistencia post-pico.

A semejanza del caso presentado, aproximadamente el 60% del total de los ensayos de corte directo realizados con diferentes interfaces geomembrana/geotextil en esta investigación, presentan envolventes de rotura no lineales, que en muchos de los casos, pueden ajustarse mediante un criterio bilineal, observándose que el punto de quiebro se encuentra dentro del rango de 50 a 100 kPa, dependiendo del tipo de geotextil y geomembrana ensayado.

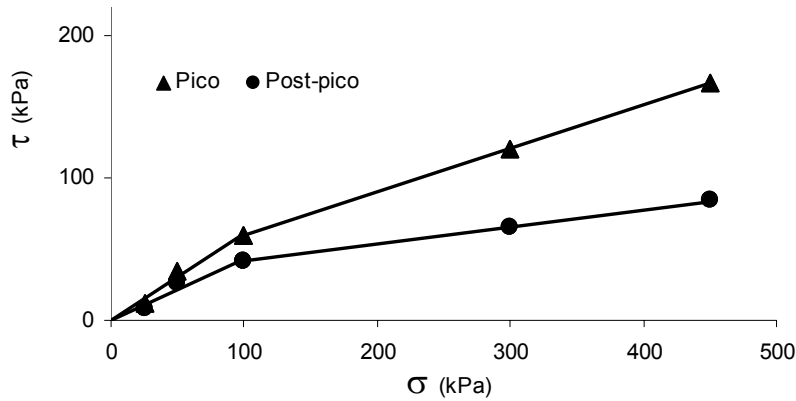


Figura 3.8 Envoltorio rotura interfaz geomembrana/geotextil (GMr2_s1/GT1)

La respuesta al corte de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil para tensiones normales bajas es diferente de la respuesta a altas tensiones, debido a los diferentes mecanismos de interacción entre la geomembrana y el geotextil que se desarrollan durante el proceso de corte, según el valor de la tensión normal aplicada. En estos mecanismos de interacción también influyen el tamaño y forma de las rugosidades de la geomembrana, así como el tipo de fibra que constituye el geotextil y su forma de fabricación, como se verá más adelante.

Cuando las tensiones normales aplicadas son bajas la interacción entre el geotextil y la geomembrana rugosa consiste en que, por un lado, fibras superficiales del geotextil se enganchan y se enredan en los salientes de la geomembrana (fenómeno denominado “*hook and loop*”) y por otro, la fricción se produce entre los picos de las rugosidades mayores de la geomembrana y el geotextil, a nivel superficial, tal como se aprecia en la Figura 3.9 a). Cuando la tensión normal aplicada aumenta, el geotextil se comprime y aumenta su imbricación con las rugosidades mayores de la geomembrana, dando lugar a que éstas se introduzcan en la matriz (fenómeno de “*interbedding*”), y a que las interacciones de fricción y “*hook and loop*” se produzcan a nivel de matriz del geotextil, tal como se ve en la Figura 3.9 b). Como la macrotextura está más introducida en el geotextil, hay contacto de éste con la microtextura presente en el sustrato base de la geomembrana, implicándose dicha microtextura en interacciones complementarias de “*hook and loop*” con fibras externas e incluso de rozamiento entre las rugosidades pequeñas y la superficie de la matriz.

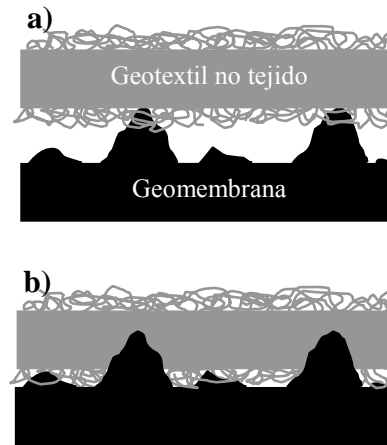


Figura 3.9 Esquema del mecanismo de interacción de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil para a) valores bajos de la tensión normal y b) valores altos de la tensión normal (después de Hebel et al., 2005)

En estas condiciones, una fracción de la resistencia tangencial corresponde a la imbricación entre la geomembrana y el geotextil, que es tanto mayor cuanto más alto es el valor de la tensión normal aplicada. La relación creciente de la resistencia tangencial y la tensión normal no es ilimitada, sino que está restringida por la máxima imbricación posible, función de la compresibilidad del geotextil y del tamaño de la rugosidad de la geomembrana. Por esta razón, a partir de un determinado valor de la tensión normal, incrementos de dicha tensión proporcionan muy poca imbricación adicional, lo que se traduce en un aumento prácticamente nulo de la componente tangencial debido a este fenómeno, manteniéndose en un valor prácticamente constante, al contrario de lo que sucede para valores inferiores a dicha tensión normal. El cambio de comportamiento puede ser gradual o sucede en un intervalo tensional relativamente pequeño, que depende de las características de los geosintéticos ensayados.

Un razonamiento similar puede aducirse para el comportamiento post-pico, si bien la fracción resistente correspondiente a la imbricación se verá claramente reducida. Para las condiciones de rotura residual, es lógico aceptar que los daños producidos durante el corte en los materiales de la interfaz proporcionan una reducción drástica de la aportación resistente correspondiente a la imbricación, lo que puede llevar a su práctica desaparición.

En el modelo desarrollado, expuesto en el siguiente capítulo, se analizan exhaustivamente estos fenómenos, estableciendo su cuantificación.

Una vez terminado el ensayo, la inspección visual de la superficie de contacto entre los materiales confirma la hipótesis del mecanismo de interacción ocasionado en la interfaz durante el corte y la razón de la pérdida de resistencia post-pico. Los daños en el geotextil consisten en estiramiento, rotura, despegue y arrancamiento de las fibras desde la matriz. Adicionalmente el desplazamiento horizontal orienta las fibras sueltas y separadas en la dirección paralela al corte. Todos estos mecanismos de rotura se intensifican con el aumento de la tensión normal. La Figura 3.10 muestra los daños producidos durante el corte en probetas de dos tipos de geotextil. Además de los mecanismos de rotura del geotextil, también el desgaste de la superficie rugosa de la geomembrana, y el daño en sus rugosidades, contribuyen al reblandecimiento y descenso de la resistencia de pico a post-pico, especialmente bajo valores altos de la tensión normal.



Figura 3.10 Daños observados en los geotextiles: a) GT3 b) GT1

3.3.2 Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz

La Figura 3.11 muestra las envolventes de rotura de ensayos realizados en condiciones secas y húmedas de cuatro interfaces diferentes: GMr1/GT1, GMr2_s1/GT1, GMr1/GT3 y GMr2_s1/GT3. Puede observarse que son muy similares los valores obtenidos de las resistencias, tanto de pico como post-pico, en ambas condiciones. Estos resultados muestran que las características resistentes al corte entre ambos geosintéticos no se ven afectadas, en la práctica, por las condiciones de humedad existentes durante el ensayo. Además los geotextiles son materiales muy permeables, por lo que la presencia de agua en el ensayo no afecta a los resultados, al encontrarse siempre en condiciones drenadas, con disipación inmediata de las presiones intersticiales generadas por las solicitaciones del ensayo.

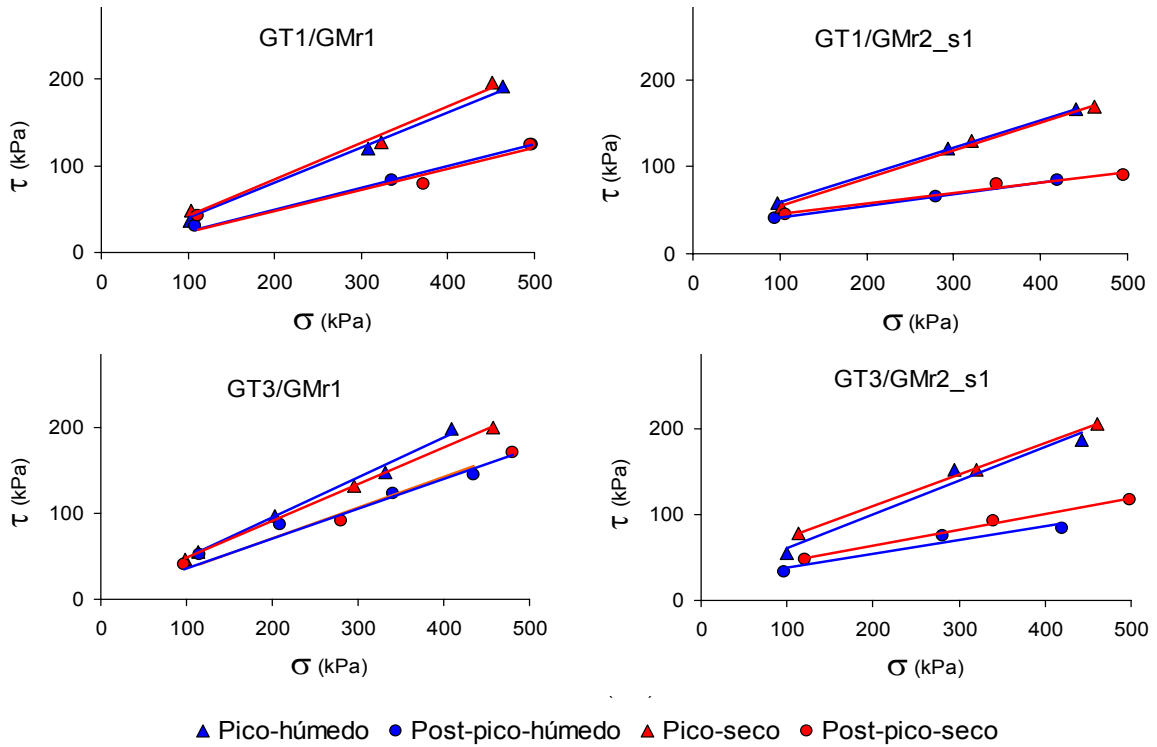


Figura 3.11 Comparación de las envolventes de rotura de ensayos realizados en condiciones húmedas y secas con la interfaz geomembrana/geotextil

3.3.3 Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz

Efecto de la existencia de rugosidad

En la Figura 3.12 se comparan las envolventes de rotura de las interfaces entre un geotextil agujeteado con dos geomembranas, siendo una de ellas lisa y la otra rugosa. Concretamente, se presentan los resultados de ensayos entre la geomembrana lisa GMI y la rugosa GMr3, ambas con el geotextil GT1. Puede observarse que la resistencia de pico y post-pico correspondiente a la interfaz con la geomembrana rugosa son mayores que las obtenidas con la lisa, en un 325% y 150%, respectivamente. Sin embargo, el reblandecimiento es mucho más acusado en el caso de la geomembrana rugosa, siendo muy escasa o nula la pérdida de resistencia de pico en la situación de la geomembrana lisa.

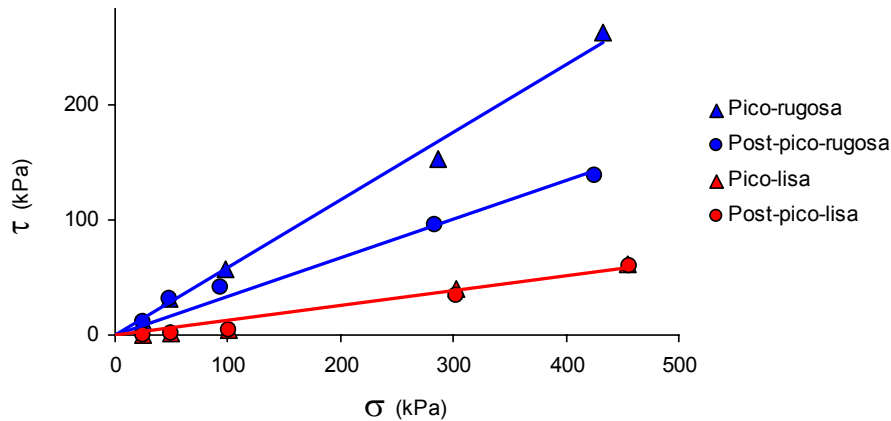


Figura 3.12 Comparación envoltorios de rotura con geomembrana lisa y rugosa

Efecto del tamaño de la macrotextura

En el apartado 3.2 ya se ha hecho referencia a la distinción entre macrotextura y microtextura. La Figura 3.13 muestra las fotografías realizadas en microscopio electrónico, que representan las vistas en planta y alzado de las rugosidades de dos tipos de geomembrana ensayadas.

La Figura 3.14(a) presenta el efecto del tamaño de la macrotextura de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz con el geotextil GT1 para dos tamaños, mayor y menor de 1 mm, GMr3 y GMr2_s2, respectivamente. Cuando las tensiones normales son menores de 50 kPa las resistencias tangenciales resultan similares, influyendo poco el tamaño de la rugosidad de la geomembrana. Para un valor de la tensión normal superior a 50 kPa la tensión tangencial de pico y post-pico es mayor en el caso de macrotextura mayor de 1 mm. Una tendencia similar presentan el resto de geotextiles ensayados, aunque dependiendo del tipo de geotextil estas diferencias serán más o menos acusadas, como se aprecia en la Figura 3.14. Para los geotextiles agujeteados (GT1 y GT2) esta diferencia es mayor que para el geotextil unidos térmicamente (GT3).

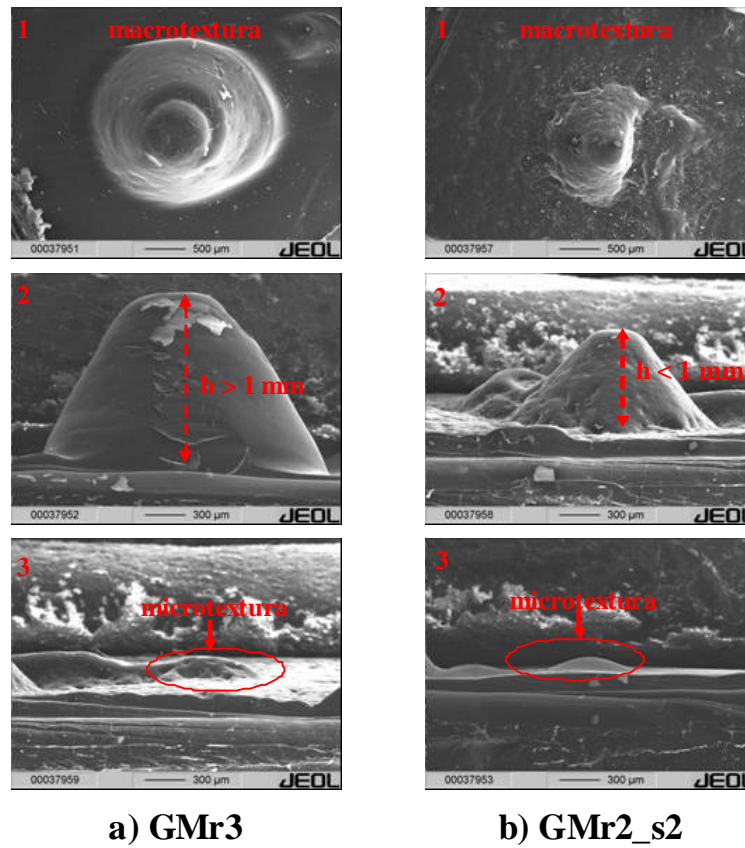


Figura 3.13 Las fotos 1 y 2 muestran respectivamente la planta y el alzado de la macrotextura. En la foto 3 se observa el alzado de la microtextura

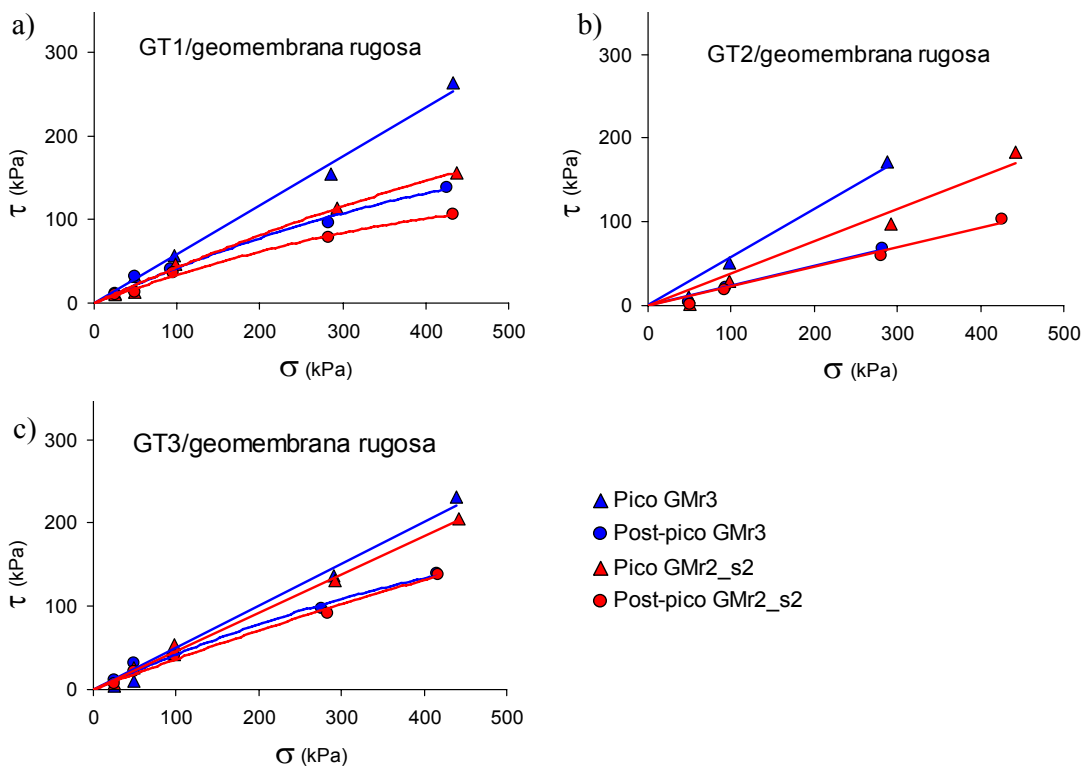


Figura 3.14 Efecto del tamaño de la macrotextura en la resistencia al corte de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil

Otra característica de los ensayos realizados con geomembranas de rugosidad mayor de 1 mm es la forma que presentan las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal. La Figura 3.15a) muestra la curva correspondiente a la aplicación de una tensión normal de 450 kPa en la interfaz GMr3/GT1. La curva presenta una rama ascendente hasta la tensión tangencial de pico, y luego una rama descendente escalonada cuya altura de salto disminuye a medida que transcurre el ensayo. El ancho de cada escalón es aproximadamente constante, entre 5.5 y 6 mm, y coincide con la distancia que existe entre las rugosidades grandes (macrotextura) de la geomembrana. El número de escalones una vez alcanzado el pico, coincide con el número de espacios entre macrorugosidades de la geomembrana, como se ve en la Figura 3.15b).

Al estar las rugosidades dispuestas de forma más o menos uniforme a lo largo de la superficie de la geomembrana, y tener dimensiones y formas similares, se producen sucesivas tensiones post-pico, ya que cada cresta de la rugosidad se encuentra una zona de geotextil en la que ha actuado otra u otras crestas anteriores que, en su deslizamiento han ido produciendo daños en el geotextil, encontrando fibras cada vez más sueltas, estiradas y orientadas, disminuyendo así los valores post-pico.

Sin embargo, para tensiones normales inferiores o iguales a 50 kPa no se aprecian dichos escalones en las curvas tensión tangencial-desplazamiento, debido a que las macrorugosidades no llegan a incrustarse del todo en el geotextil, y se produce un rozamiento más uniforme, como se ve en la Figura 3.15a).

Cabe señalar que tampoco se aprecia escalonamiento post-pico en las curvas tensión tangencial-desplazamiento correspondiente a las interfaces con geomembranas de rugosidad menor a 1 mm de altura, tal como puede verse en la Figura 3.16, que corresponde a la interfaz entre la geomembrana GMr1 y el geotextil GT1 a 450 kPa y 50 kPa de tensión normal.

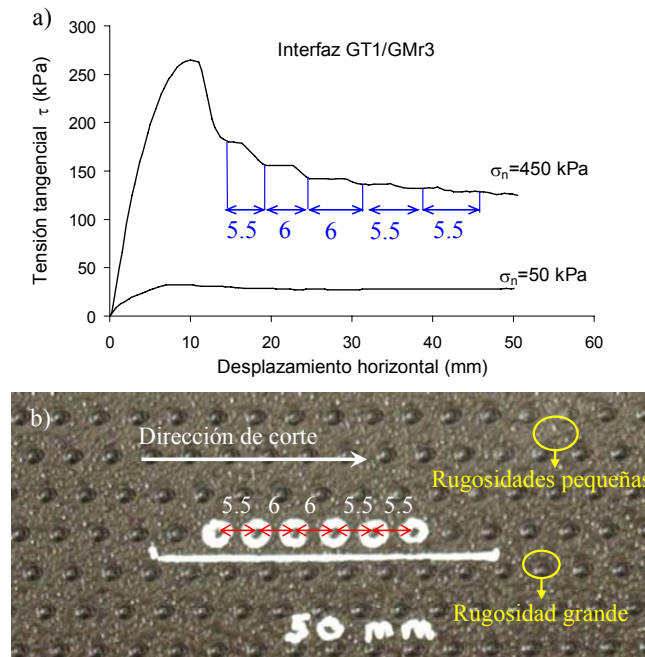


Figura 3.15 Efecto de la macrotextura > 1 mm en la forma de la curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal

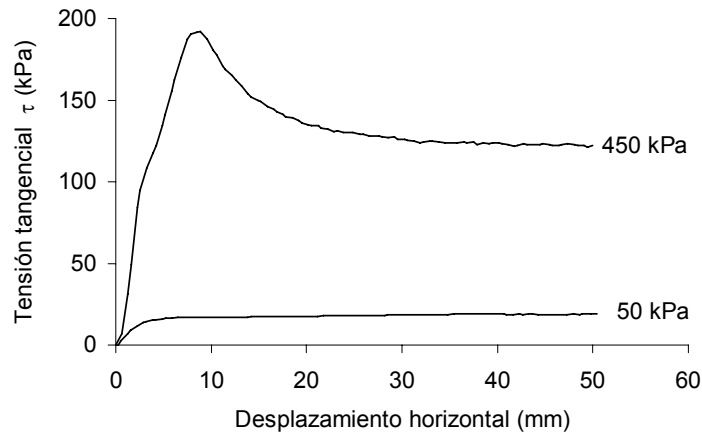


Figura 3.16 Comportamiento resistente de la interfaz GMr1/GT1

Efecto de la densidad de macrotextura de tamaño superior a 1 mm

La Figura 3.17 compara las envolventes de rotura de las interfaces entre un geotextil (GT1, GT2 y GT3) y dos tipos de geomembrana rugosa, GMr3 y GMr2_s1. Ambas disponen de rugosidades superiores a 1 mm, pero la densidad aproximada de éstas es de 9 unidades/cm² en la GMr3 y de 4 unidades/cm² en la GMr2_s1.

Se observa que la resistencia que se obtiene con la geomembrana GMr3 es siempre superior a la correspondiente a la geomembrana GMr2, de menor densidad rugosa. Este efecto es tanto más acusado, cuanto mayor es el valor de la tensión normal aplicada,

influyendo menos en rangos de baja tensión normal. Puede decirse que, para la mayoría de los casos ensayados, la influencia se manifiesta en mayor medida a partir de los 100 kPa de tensión normal.

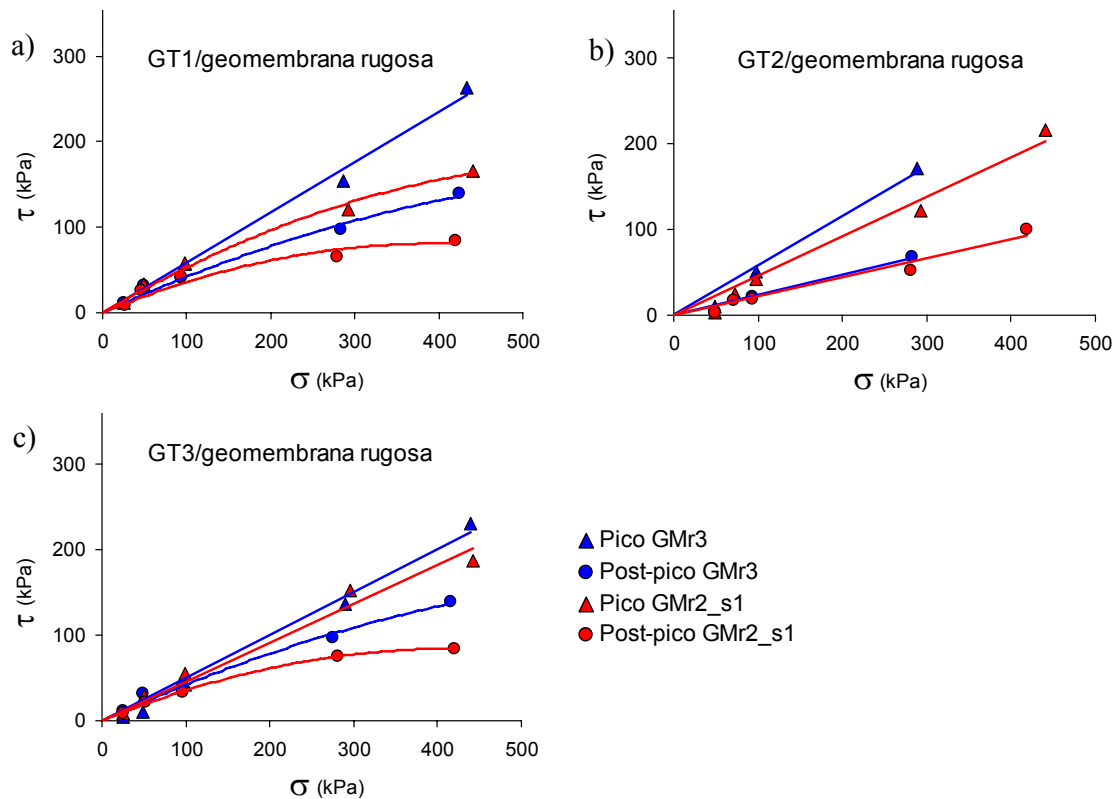


Figura 3.17 Efecto de la densidad de macrotextura en la resistencia al corte de las interfaces geomembrana rugosa/geotextil

Efecto del tipo de rugosidad de tamaño menor a 1 mm

En el apartado 3.2, al describir los tipos de geomembranas ensayadas, se ha hablado de los diferentes procesos de fabricación que generan diversas formas y tamaños de rugosidad, como se aprecia en la Figura 3.18. En esta figura se presentan imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de las tres geomembranas ensayadas con rugosidad inferior a 1 mm, las cuales corresponden a tres formas distintas de fabricación.

La Figura 3.19 muestra el efecto del proceso de fabricación y la consiguiente forma de las rugosidades en la resistencia al corte de la interfaz entre las geomembranas GMr1, GMr2_s2 y GMr4 y el geotextil GT1. Aunque existen diferencias claras entre la geometría, tamaño y disposición de la rugosidad de las geomembranas GMr2_s2 y GMr1, ambas presentan envolventes de rotura de pico y post-pico similares. Sin

embargo la resistencia aportada por la GMr4 es inferior, lo que es coherente con el menor tamaño de la rugosidad y mayor suavidad de la superficie de dicha geomembrana respecto a GMr1 y GMr2_s2. Estas últimas presentan un aumento de la resistencia de pico y post-pico del 24% y 36%, respectivamente, respecto a la resistencia que se obtiene con la GMr4.

Como compendio de lo anterior, en la Figura 3.20 se presenta la variación de la resistencia de pico y post-pico para el caso del geotextil GT1 y valores de las tensiones normales de 100 y 300 kPa.

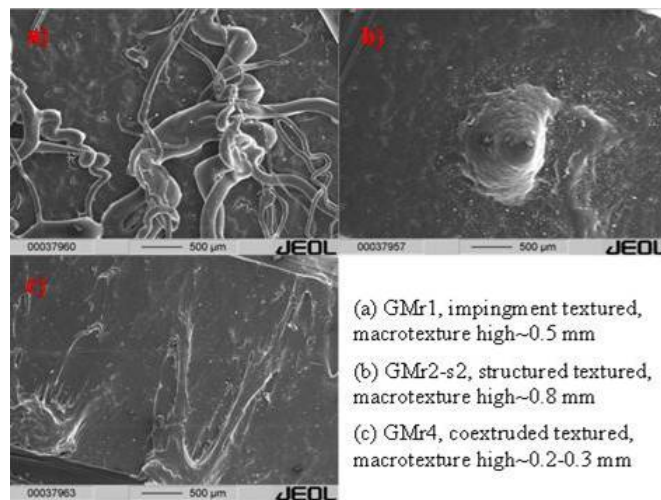


Figura 3.18 Imágenes tres tipos de geomembranas con tamaño rugosidad <1 mm

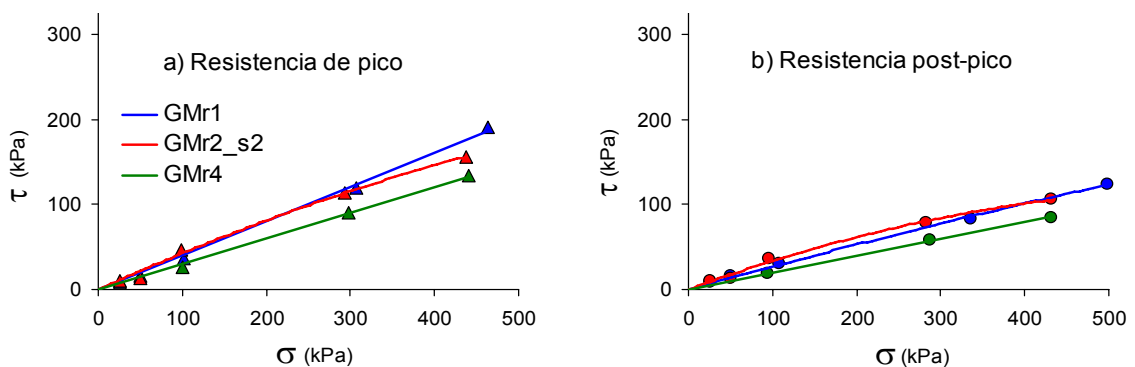


Figura 3.19 Envoltentes rotura interfaz geomembrana rugosa/geotextil (GT1)

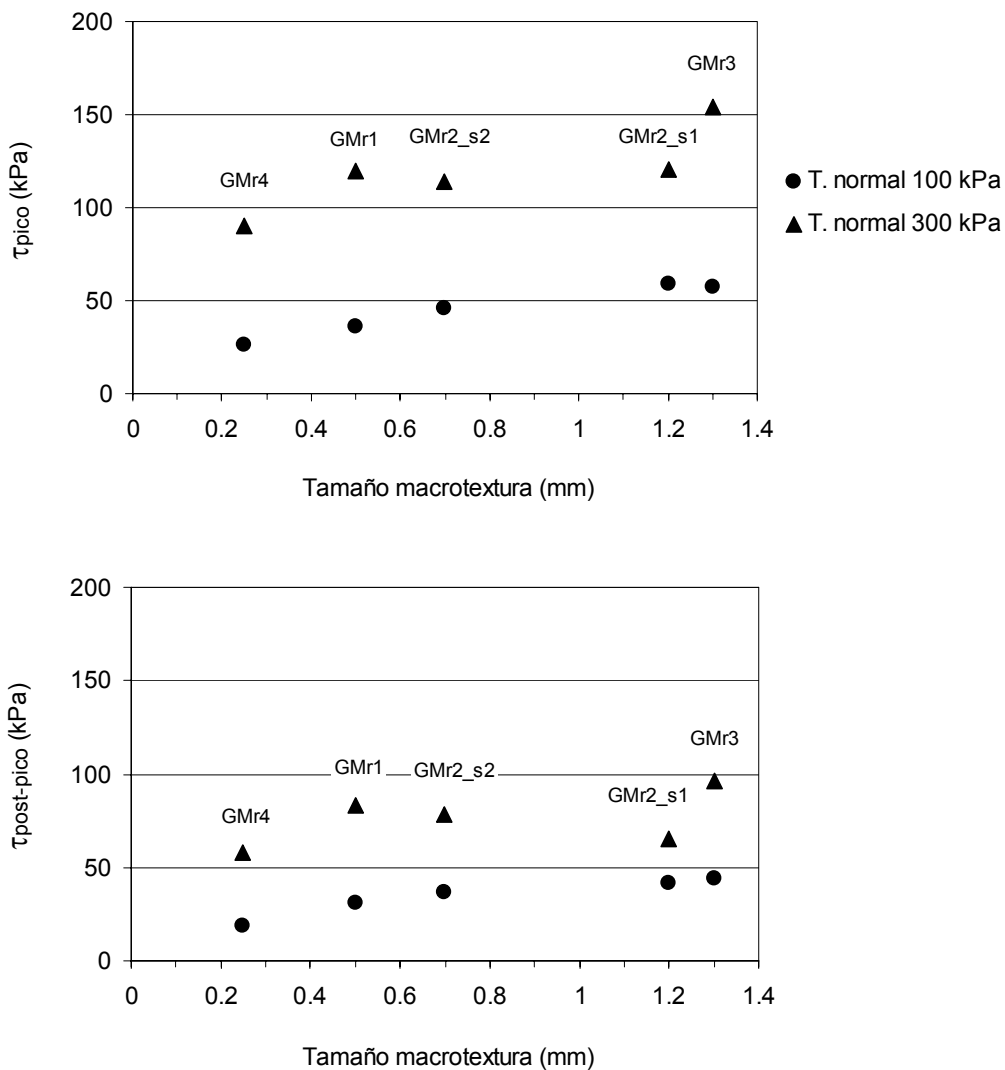


Figura 3.20 Variación del coeficiente de rozamiento con el tamaño de la rugosidad para el geotextil GT1

3.3.4 Influencia del tipo de geotextil en la resistencia al corte de la interfaz

En el apartado anterior se han analizado los resultados desde el punto de vista de las características de las geomembranas en cuanto a tamaño, forma, disposición y densidad superficial de sus rugosidades. En lo que sigue, se examina el comportamiento de las interfaces ensayadas desde el enfoque de las características de los geotextiles en cuanto a tipo de fibra y proceso de fabricación.

Ensayos con geomembrana lisa

En el contacto de los geotextiles con una geomembrana lisa no existe imbricación, por lo que el comportamiento de estas interfaces depende bastante de la aspereza superficial del geotextil, función de las fibras que lo constituyen y del modo en que está fabricado.

En la Figura 3.21 se comparan las envolventes de rotura de los tres tipos de geotextiles ensayados. No se experimenta reblandecimiento post rotura. La adhesión es nula y el ángulo de rozamiento se encuentra entre 5° y 8°. Correspondiendo la resistencia mayor al geotextil termofundido y la menor al geotextil agujeteado de fibra corta.

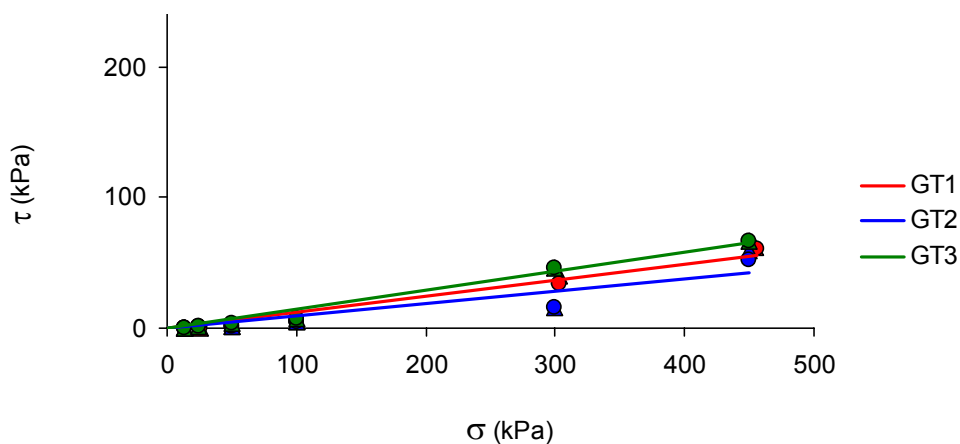


Figura 3.21 Comparación de envolventes de rotura geomembrana lisa/geotextil

Efecto de la longitud de fibra del geotextil agujeteado

La Figura 3.22 compara las envolventes de rotura de las interfaces geomembrana rugosa (GMr1, GMr2, GMr3 y GMr4) y geotextil agujeteado (GT1 y GT2). El GT1 está formado por monofilamentos, y el GT2 está compuesto de fibras cortas. Si se considera la interfaz con la geomembrana GMr3 (Figura 3.22(d)) puede apreciarse que el contacto de la geomembrana con ambos materiales presenta envolventes de pico similares, mientras que la envolvente post-pico del geotextil GT1 es superior a la del GT2.

Esto último es consecuencia de que las fibras cortas que forman el geotextil GT2 son separadas y orientadas paralelamente a la dirección de corte con mayor facilidad, en mayor número y para desplazamientos horizontales menores que en el caso de las fibras continuas usadas en la fabricación del geotextil GT1. Por lo que la degradación experimentada en el geotextil GT2 es mayor incidiendo en la pérdida de resistencia post-pico.

Estos efectos se reproducen en el resto de ensayos realizados con otro tipo de geomembranas, como muestra la Figura 3.22. Una excepción a este comportamiento corresponde a la interfaz entre los geotextiles estudiados y la geomembrana GMr4 (Figura 3.22(e)). En este caso, ambos geotextiles presentan envolvente de rotura de pico y post-pico similares. La mayor diferencia de la geomembrana GMr4, respecto al resto de geomembranas, es que sus rugosidades presentan el menor tamaño, aristas redondeadas, y son más suaves al tacto, reduciéndose el enganche y enredo inicial entre las fibras y las rugosidades, así como el daño de desgarro, separación y orientación de las fibras posterior.

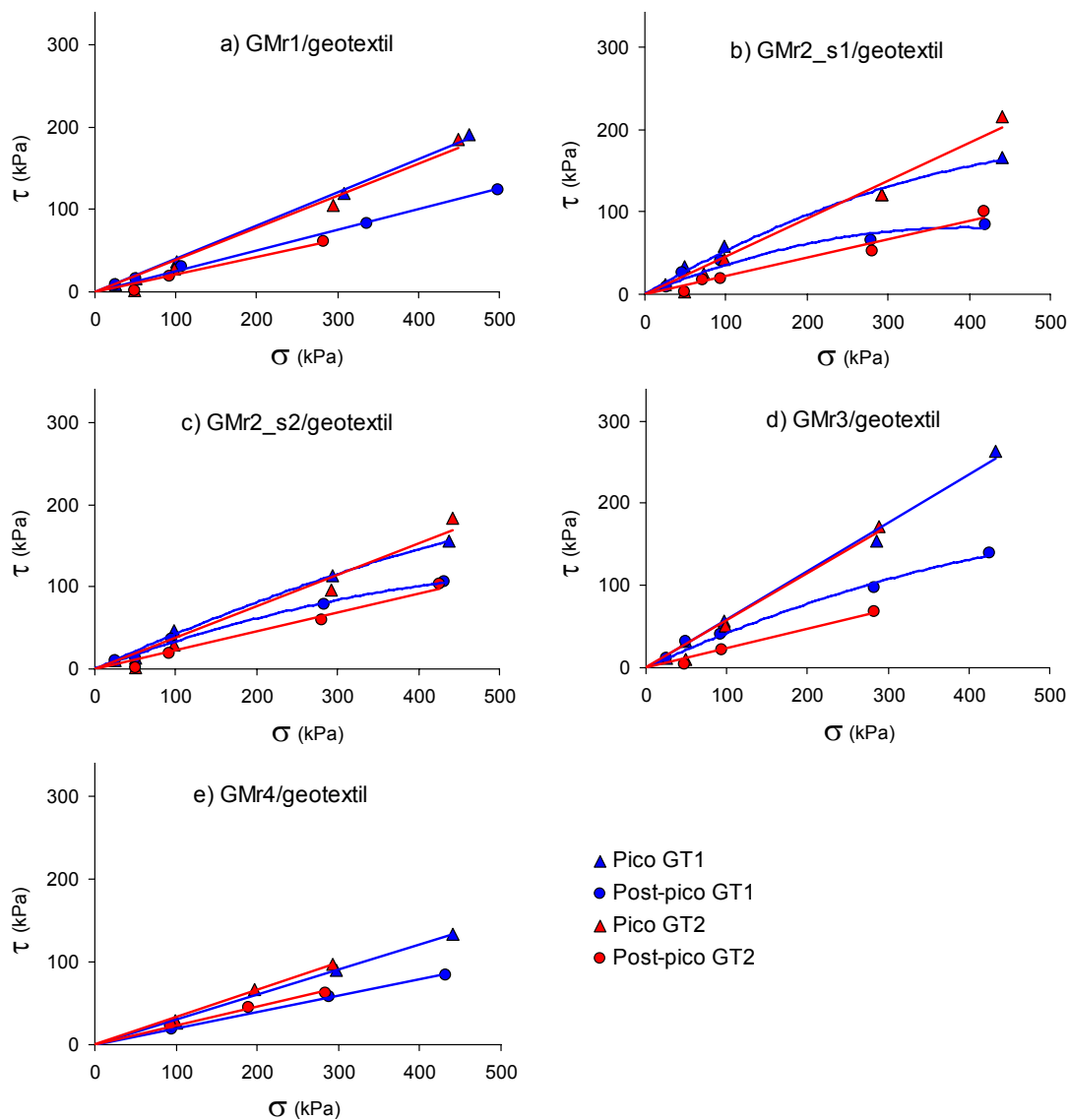


Figura 3.22 Efecto de la longitud de fibra del geotextil

La Figura 3.23 y Figura 3.24 presentan la sensibilidad de las interfaces entre geotextil agujeteado y geomembrana rugosa. En los dos tipos de geotextil agujeteado los mayores valores de sensibilidad se obtienen para las geomembranas con macrotextura mayor de 1 mm. Éstas generan una pérdida de tensión tangencial post-pico mayor que las geomembranas con rugosidades menores de 1 mm. La mayor imbricación de las primeras en los geotextiles implica mayores daños en las fibras de éstos (estiramiento, separación, arrancamiento y rotura), así como doblado y pulido de las rugosidades. Esto, lógicamente, es tanto más acusado cuanto mayor es la tensión normal aplicada.

Los valores de sensibilidad dependen del tipo de geotextil y geomembrana, y de la tensión normal actuante, según se aprecia en las figuras. El comportamiento general, con alguna excepción, es de no existencia de tensión de post-pico (sensibilidad igual a 1) para valores de la tensión normal inferiores a 50 kPa; un incremento rápido de la sensibilidad entre 50 y 100 kPa, tendiendo gradualmente a estabilizar su valor para tensiones superiores a 300 kPa.

Los valores máximos se obtienen para las geomembranas GM2_s1 y GMr3, entre 2 y 2.5. Con las geomembranas de rugosidades menores a 1 mm la sensibilidad alcanza un valor más uniforme entre 1.5 y 1.7.

Como se observa en la Figura 3.25, donde se representa la sensibilidad frente al tamaño de rugosidad, el geotextil de fibra corta, GT2, presenta mayores valores de la sensibilidad, en concordancia con lo descrito anteriormente.

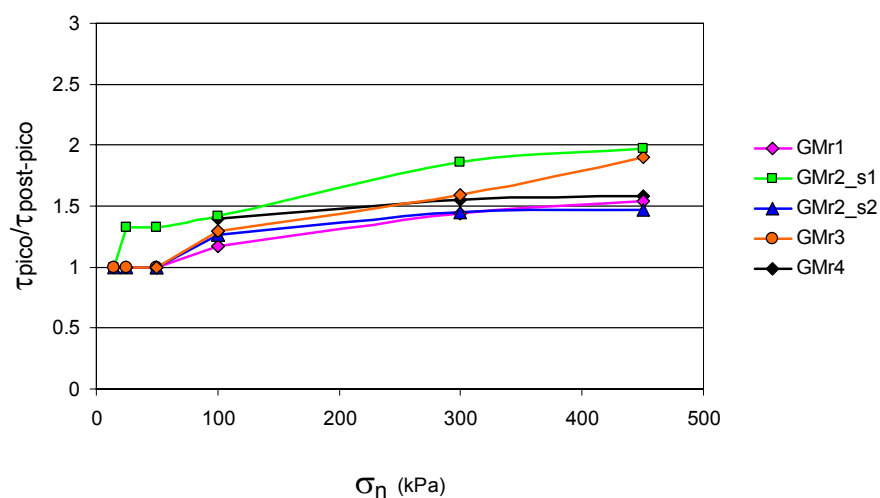


Figura 3.23 Sensibilidad del geotextil agujeteado de fibra larga (GT1)

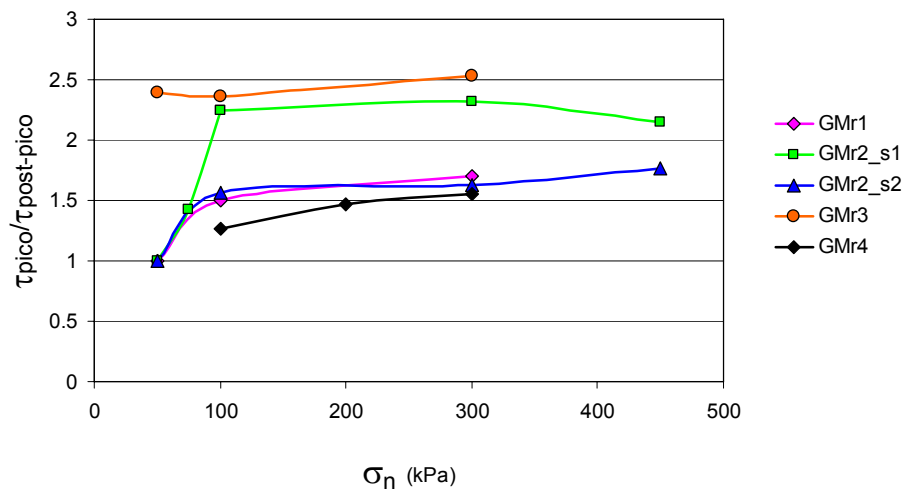


Figura 3.24 Sensibilidad del geotextil agujeteado de fibra corta (GT2)

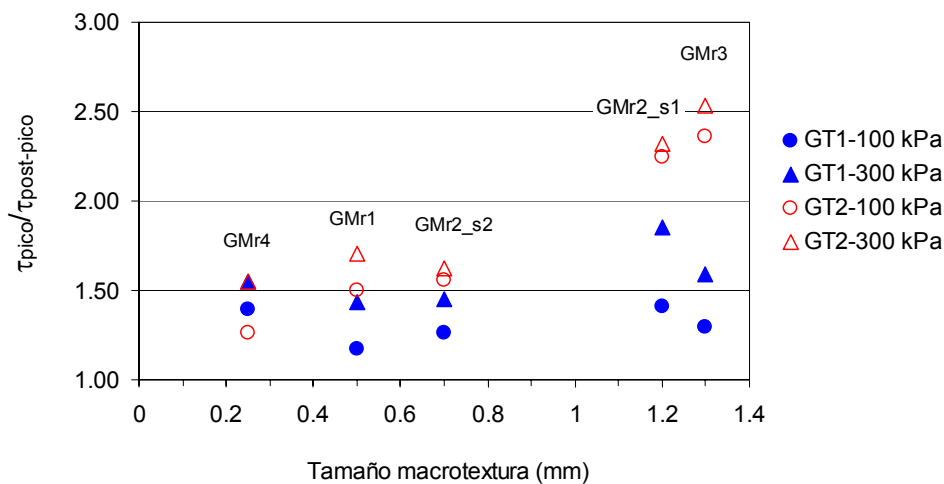


Figura 3.25 Variación de la sensibilidad con el tamaño de la macrorugosidad (geotextiles agujeteados)

Efecto del método de fabricación del geotextil

En la Figura 3.28 se comparan las envolventes de rotura del geotextil GT3 y GT1 ambos formados por el mismo tipo de fibra, monofilamento, pero diferentes métodos de fabricación, el GT3 es termosoldado, y el GT1 es agujeteado.

Las tres gráficas de la izquierda corresponden a las geomembranas con rugosidad inferior a 1 mm. Puede verse que en todas ellas la resistencia de pico y post-pico obtenida para el geotextil termosoldado es del orden de 15% y 35%, respectivamente, superior a la del geotextil agujeteado.

De la observación de las muestras posterior al ensayo, se aprecia que, así como las fibras del geotextil GT1 se orientan y se separan durante el proceso de corte, las del

geotextil GT3 siguen manteniéndose enredadas, proporcionando un mayor enganche en las rugosidades, lo que justifica la aportación de mayor resistencia.

Sin embargo, este comportamiento deja de detectarse de forma tan clara cuando se trata de las geomembranas de rugosidad superior a 1 mm, como se aprecia en los gráficos de la derecha. En este caso parece tener mayor importancia la forma de la macrorugosidad que el tipo de geotextil ensayado. Así, no siempre presenta mayor resistencia de pico el geotextil termosoldado, y la resistencia post-pico es similar en ambos casos.

Como muestra la Figura 3.29, las envolventes de rotura que se obtienen con el geotextil termosoldado (GT3), son similares para todos los tipos de geomembranas rugosas ensayadas, y únicamente la interfaz con la GMr4 presenta una envolvente de rotura inferior porque sus rugosidades tienen la menor altura, y bordes redondeados. Esto último también ocurre con el geotextil agujeteado (GT1), aunque en este caso si influye el tipo de geomembrana rugosa en la resistencia al corte, como ya se ha comentado en el apartado 3.3.3.

En términos de sensibilidad, si comparamos la Figura 3.26, sensibilidad de las interfaces geomembrana/GT3, y la Figura 3.23(a), sensibilidad de las interfaces geomembrana/GT1, se observan tendencias similares en ambos casos. Para valores inferiores a 50 kPa de tensión normal la sensibilidad es 1, entre 50 kPa y 100 kPa se incrementa rápidamente, para después permanecer prácticamente constante o incrementar suavemente. Para las geomembranas de rugosidad menor a 1 mm, se obtienen valores entre 1.4 y 1.5, y para las geomembranas de rugosidad mayor a 1 mm, entre 1.8 y 2.2. La Figura 3.27 muestra la sensibilidad frente al tamaño de la rugosidad para el GT1 y GT3, observándose valores parecidos en la mayoría de los casos.

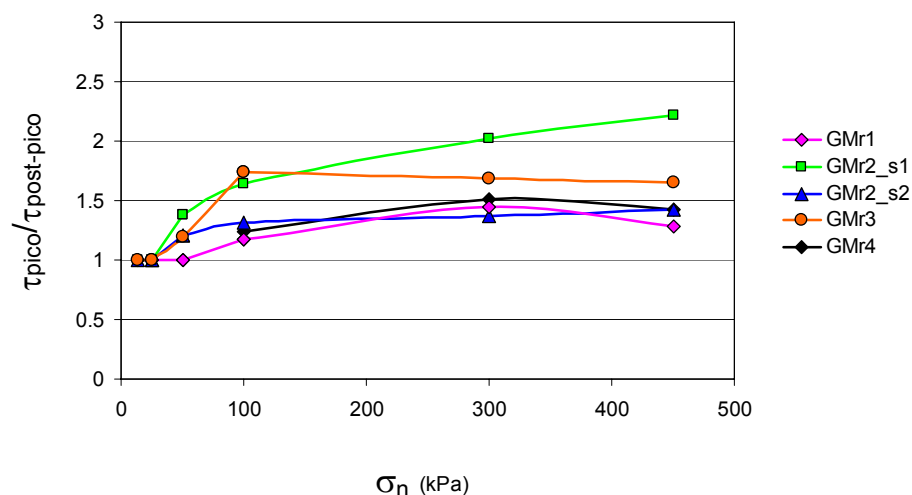


Figura 3.26 Sensibilidad del geotextil termosoldado (GT3)

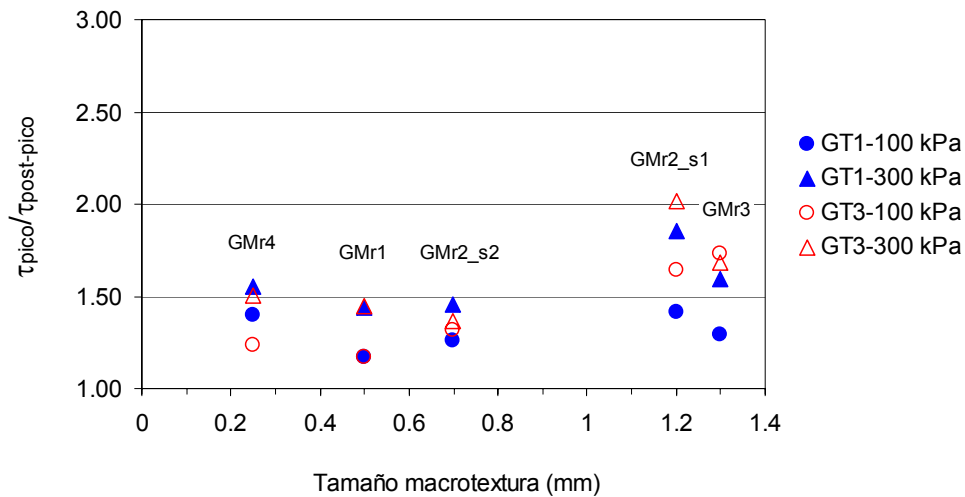


Figura 3.27 Variación de la sensibilidad con el tamaño de la macrorugosidad, geotextil agujeteado (GT1) y termosoldado (GT3)

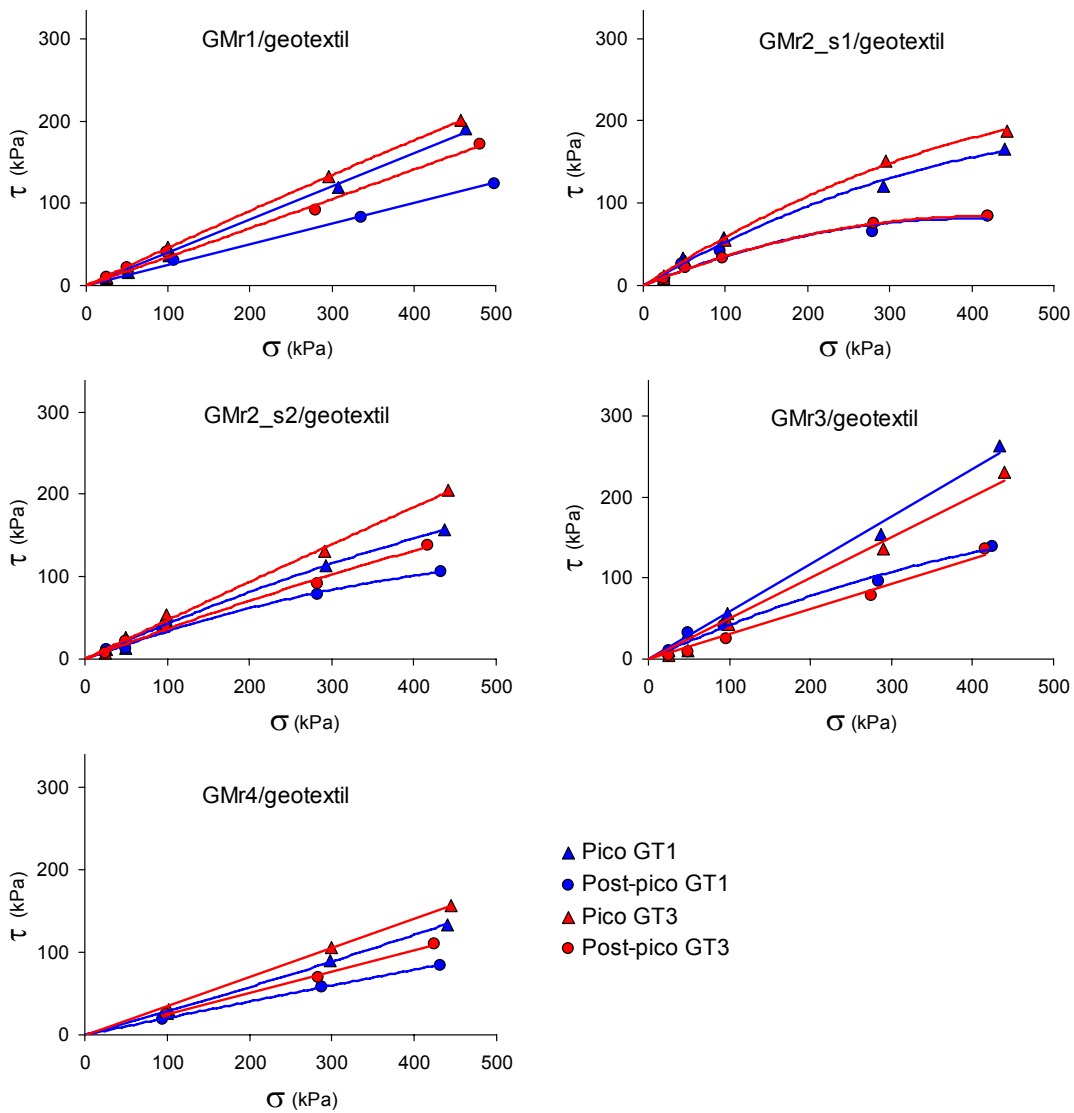


Figura 3.28 Efecto del método de fabricación del geotextil

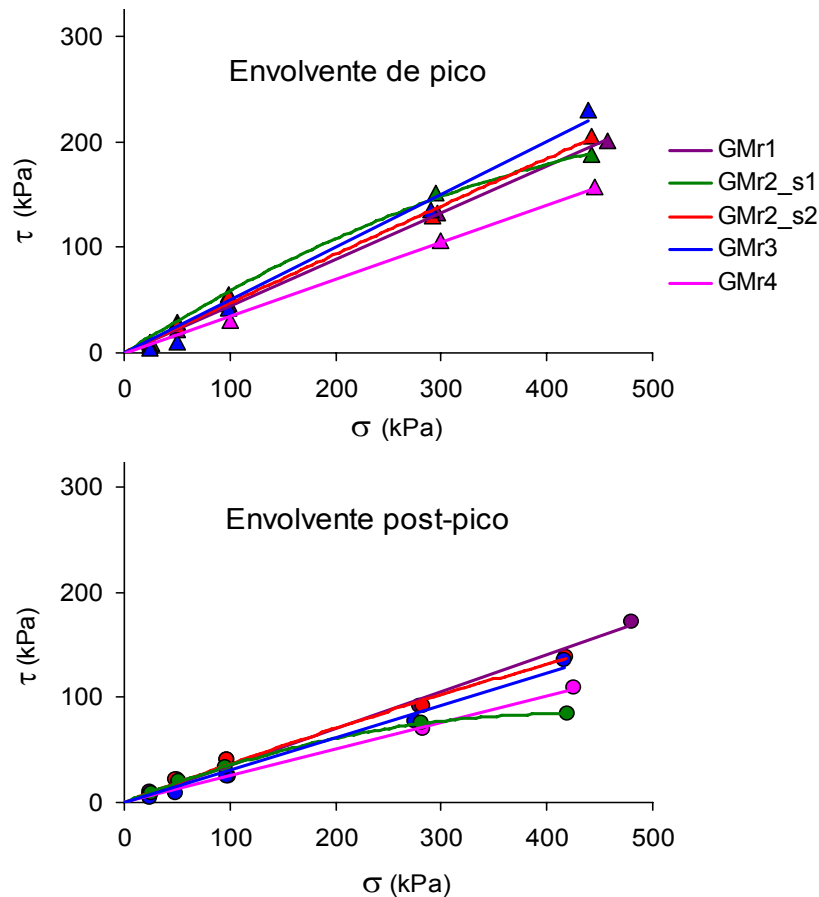


Figura 3.29 Envoltentes de rotura de las interfaces geomembrana/geotextil(GT3)

3.3.5 Comparación de los resultados obtenidos con otros autores

A continuación se establece una comparación entre los resultados obtenidos en la presente investigación y los presentados en diversos trabajos publicados. Aunque todos los ensayos se refieren a interfaz geomembrana rugosa/geotextil no tejido, los aparatos de ensayo, dimensiones de la muestra, materiales utilizados y rango de tensiones normales aplicadas en los ensayos son diferentes a los utilizados en el presente estudio.

Los resultados que se recogen corresponden a los siguientes investigadores:

- Giroud et al., 1990: ensayos de corte directo 300x300 mm (Giroud-1) y plano inclinado (Giroud-2).
- Koutsourais et al., 1991: ensayos de corte directo 300x300 mm (Koutsourais-1) y plano inclinado 51x102 mm (Koutsourais-2)
- Stark et al., 1996: corte anular, $\varnothing_{\text{interior}}=70$ mm, $\varnothing_{\text{exterior}}=100$ mm (Stark)
- Jones y Dixon, 1998: ensayos de corte directo 300x300 mm (Jones-1), y anillo de corte, $\varnothing_{\text{interior}}=70$ mm, $\varnothing_{\text{exterior}}=100$ mm (Jones-2)

- Wasti y Özdüzgün, 2001: ensayos corte directo 300x300 mm (Wasti-1) y 60x60 mm (Wasti-2), plano inclinado 300x300 mm (Wasti-3) y 60x60 mm (Wasti-4)
- Pasquallini et al., 2002: ensayos de corte directo 60x60 mm (Pasquallini)
- Hebel et al., 2005: ensayos de corte directo 100x100 mm (Hebel)
- Universidad de Cantabria: ensayos de corte directo 300x300 mm (UC)

La Figura 3.30 compara los resultados de tensión tangencial de pico para diversas investigaciones realizadas con aparato de corte directo, así como con plano inclinado habiéndose utilizado muestras cuadradas de 300 mm y 100 mm de lado. Asimismo se recogen resultados de ensayos de anillo de corte con $\varnothing_{\text{interior}}=70$ mm y $\varnothing_{\text{exterior}}=100$ mm. Las gráficas muestran un buen acuerdo entre los resultados del presente estudio y los valores recogidos en la bibliografía.

La Figura 3.31 compara resultados de tensión tangencial post-pico y residual que han sido obtenidos en las anteriores investigaciones. Los ensayos presentados por Stark y Jones muestran algunos valores de tensión tangencial residual inferiores a los restantes, debido a que el corte anular proporciona desplazamientos mucho mayores que el ensayo de corte directo, lo que permite valorar la resistencia residual con mayor fiabilidad. En cualquier caso, hay que llamar la atención respecto a que bastantes ensayos de corte directo de la presente investigación proporcionan resultados de tensión tangencial post-pico, con desplazamientos horizontales de 45-50 mm, que se aproximan a los residuales aportados con el anillo de corte.

La Figura 3.32 compara los resultados de la tensión tangencial de pico, aunque las muestras de geosintéticos, empleadas por otros autores en el ensayo de corte directo, tienen dimensiones más pequeñas, 60x60 mm. La mayoría de los ensayos realizados con dichas muestras proporcionan valores mayores de la tensión de pico que las muestras 300x300 mm utilizadas en este estudio.

La Figura 3.33 compara la tensión tangencial post-pico y residual de ensayos realizados con muestras de pequeño tamaño. Las gráficas muestran un buen acuerdo entre los resultados del presente estudio y los valores recogidos de la bibliografía.

En base a todos los resultados recogidos puede decirse que la mayoría de los ensayos de corte de la interfaz geotextil no tejido/geomembrana rugosa se encuentra en un rango amplio de la relación $\tau_{\text{pico}}/\sigma_n$ que se evalúa entre 15° y 40° mientras que en situación post-pico $\tau_{\text{post-pico}}/\sigma_n$ está entre 10° y 25°.

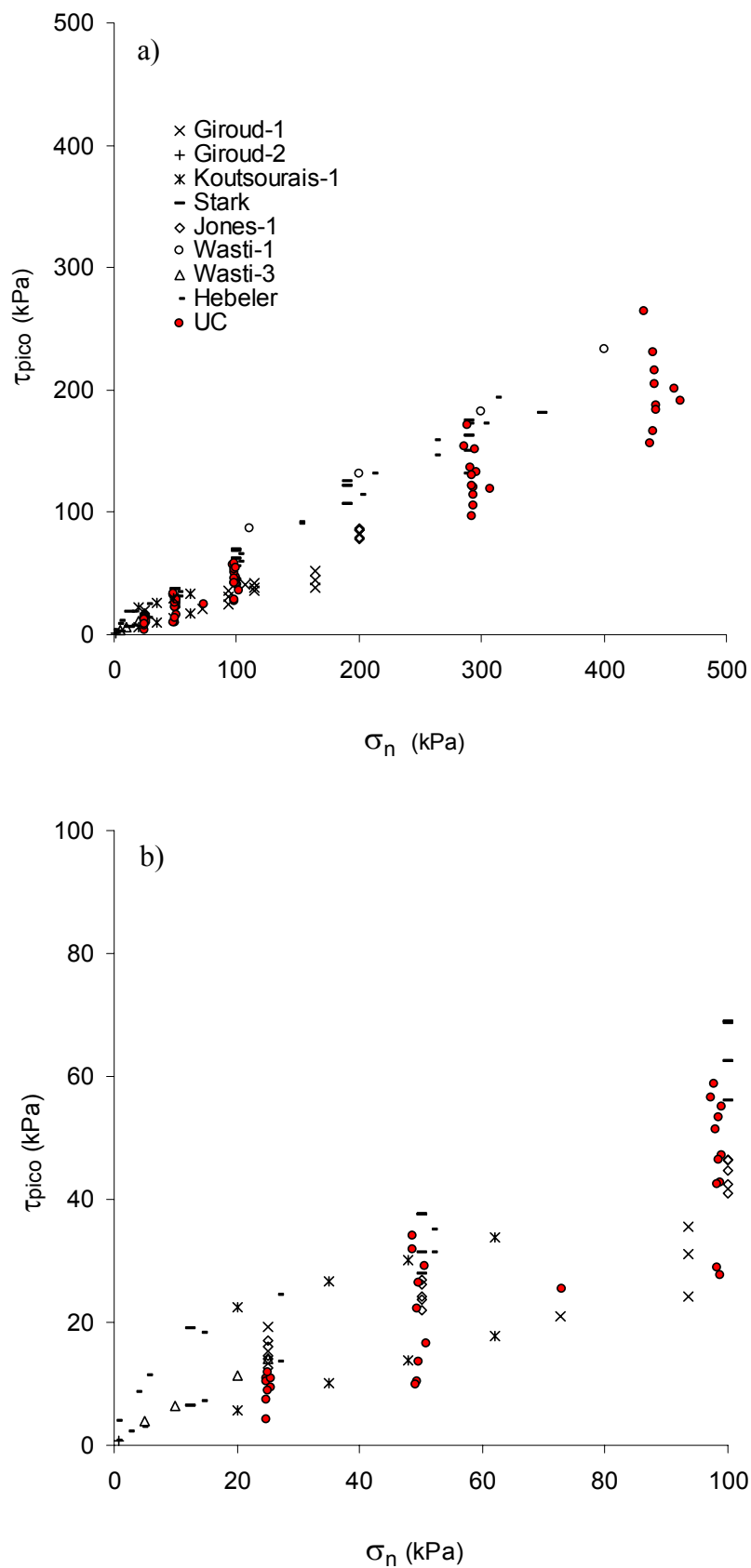


Figura 3.30 Comparación entre tensiones tangenciales de pico. Tamaño de muestra grande. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa

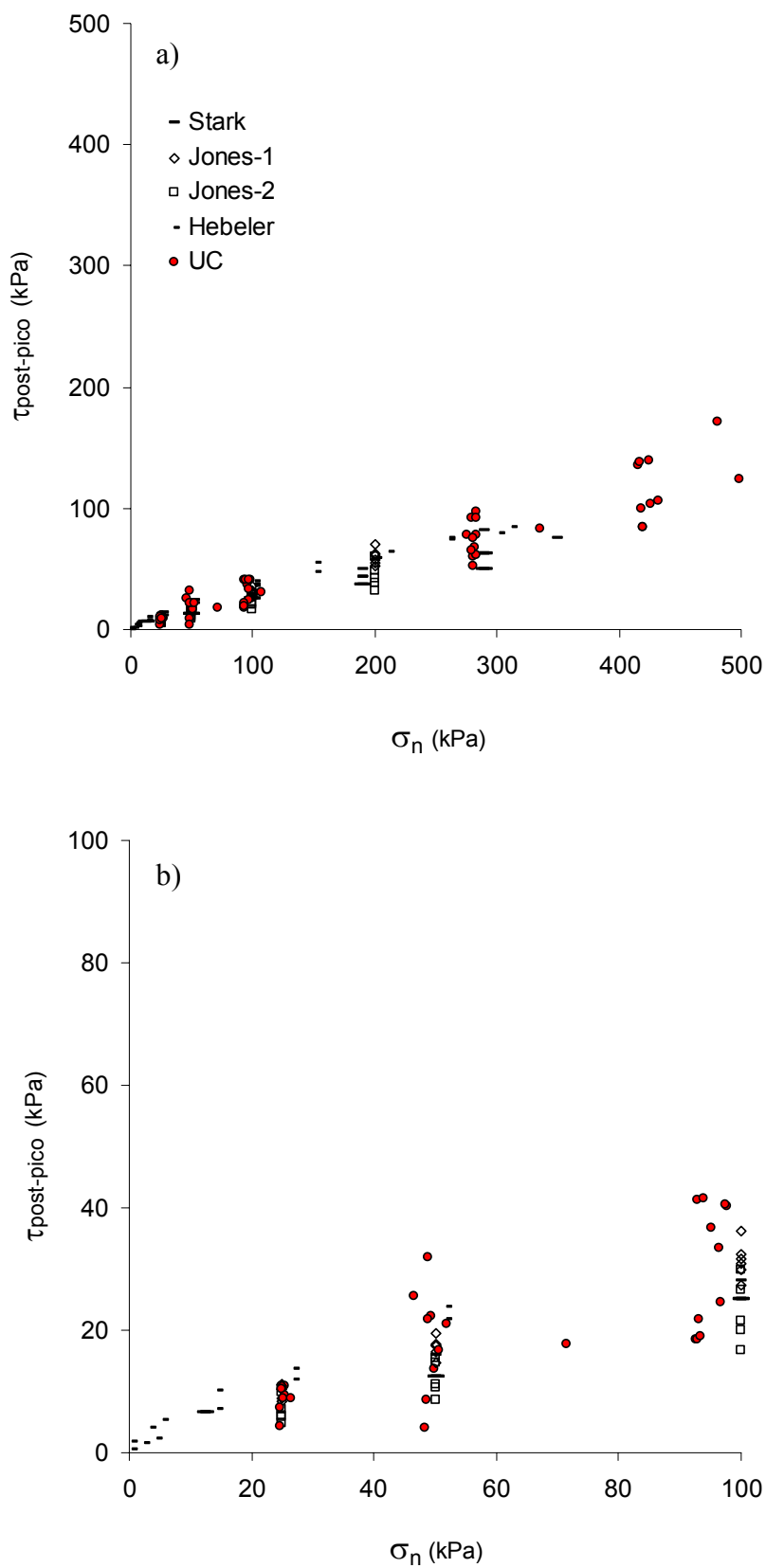


Figura 3.31 Comparación entre tensiones tangenciales post-pico. Tamaño de muestras grande. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa

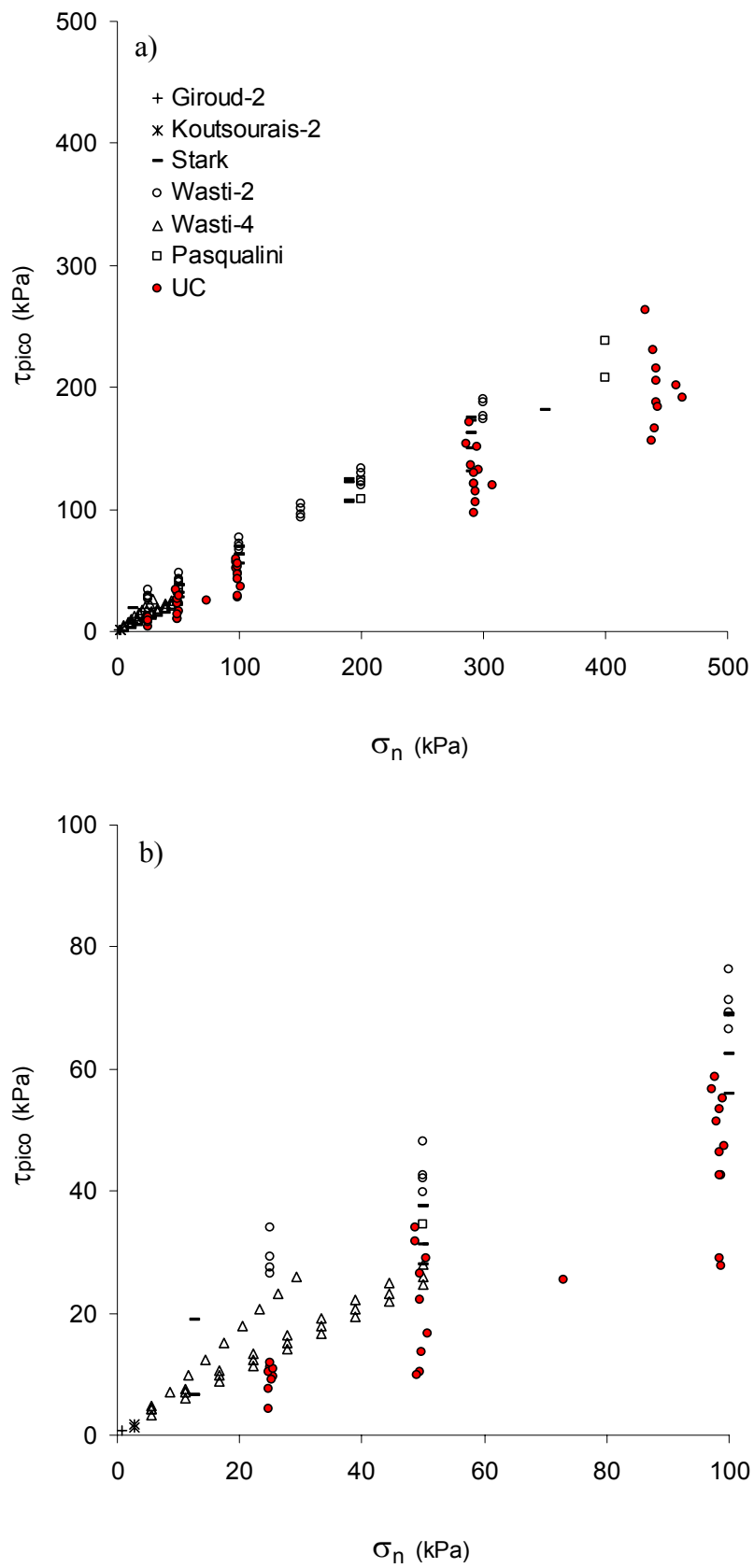


Figura 3.32 Comparación de tensiones tangenciales pico. Tamaño de muestras pequeño. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa

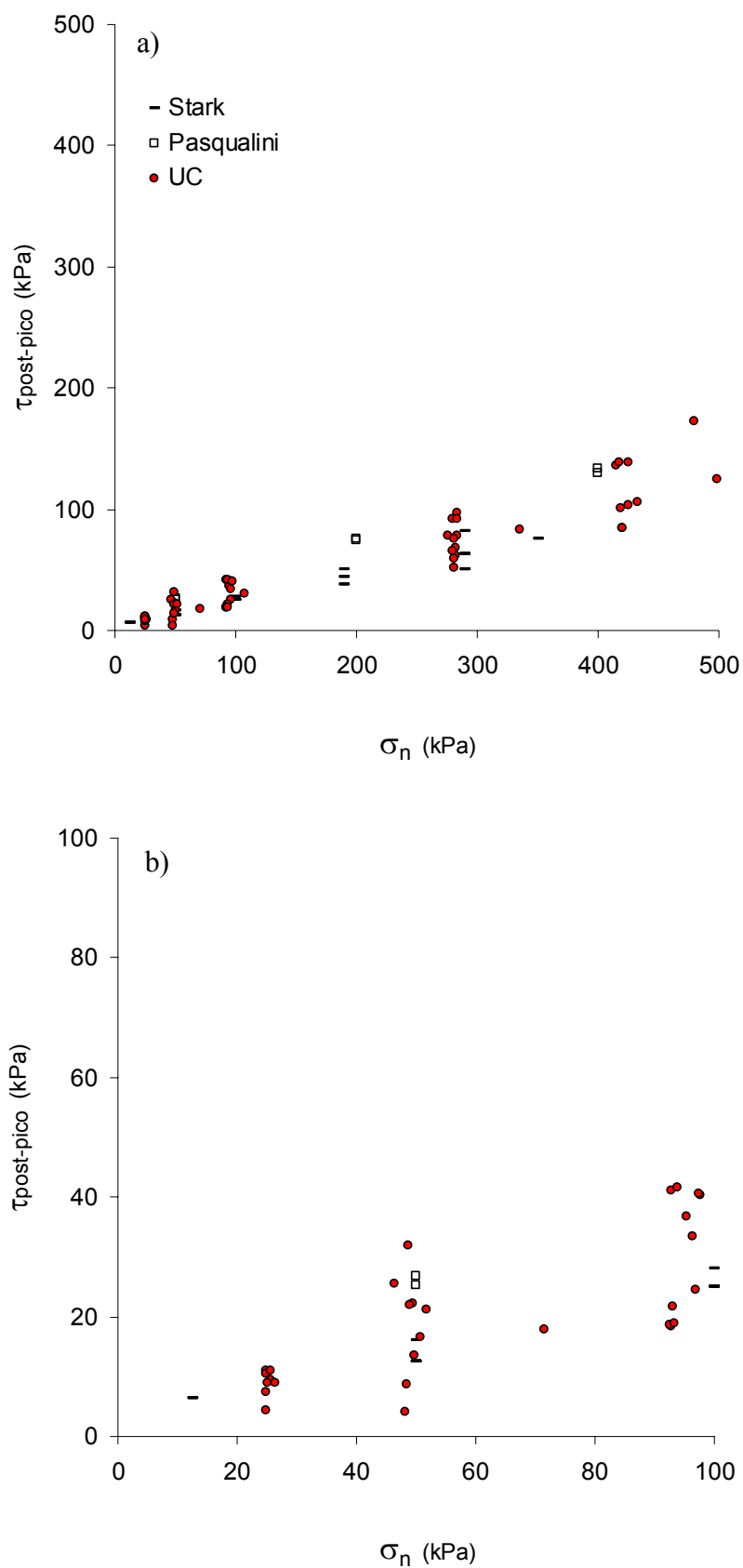


Figura 3.33 Comparación de tensiones tangenciales post-pico. Tamaño de muestras pequeño. a) $\sigma_n < 500$ kPa, b) $\sigma_n < 100$ kPa

3.4 Interfaz geomembrana/geocompuesto drenante

Este tipo de interfaz se presenta en las capas de sellado de vertedero. Con el fin de caracterizar el comportamiento resistente al corte del contacto entre estos geosintéticos se han realizado 40 ensayos de corte directo bajo tensiones normales de 25, 50 y 100 kPa, rango adecuado a las cargas existentes en el sellado (Tabla 3.7).

Como se indicó anteriormente para la interfaz geomembrana/geotextil, los resultados en condiciones secas y húmedas resultaron ser similares. En la interfaz geomembrana/geocompuesto, al tratarse también de un contacto directo entre geomembrana y geotextil, cabe hacer la misma consideración. En este caso los ensayos se realizaron en condiciones secas.

La velocidad de ensayo se ha establecido en 5 mm/min, alcanzándose un desplazamiento horizontal máximo de 50 mm. En los ensayos realizados con geomembranas rugosas la tensión tangencial de pico normalmente se moviliza entre 3 y 8 mm y la resistencia post-pico se ha obtenido en torno a los 50 mm de desplazamiento horizontal.

Tabla 3.7 Ensayos interfaz geomembrana/geocompuesto

Interfaz	Ensayo seco
GMr1/GC1(200)*	4
GMr2_s1/GC1(200)	3
GMr2_s2/GC1(200)	3
GMr3/GC1(200)	4
GMr4/GC1(200)	3
GMI/GC1(200)	3
GC1	5
GMr2_s2/GC2(140)**	3
GMr3/GC2(140)	3
GMr4/ GC2(140)	3
GMI/GC2(140)	3
GC2	3

*GC1(200) ensayado por la cara del geotextil de 200 gr/m²

**GC2(140) ensayado por la cara del geotextil de 140 gr/m²

3.4.1 Comportamiento resistente al corte de la interfaz

De la experiencia obtenida a partir de los resultados de los ensayos realizados, y de los daños observados en las caras de las interfaces posteriormente al ensayo, se deduce que los mecanismos de interacción entre los geosintéticos dependen del valor de la tensión normal aplicada, así como de las características de éstos. Los aspectos de los geosintéticos con influencia en el comportamiento son:

- Características del geotextil en contacto con la geomembrana, sobre todo la masa por unidad de área.
- Tamaño de las rugosidades de la geomembrana.
- Características de la geored que forma el geocompuesto drenante.

La Figura 3.34 presenta unas curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal representativas de los resultados que se obtienen para la interfaz geomembrana rugosa/geocompuesto. Las curvas de trazo discontinuo corresponden a una geomembrana con tamaño de macrotextura superior a 1 mm, mientras las de trazo continuo pertenecen a una geomembrana con tamaño de rugosidad inferior a 1 mm. Ambas han sido ensayadas para el mismo tipo de geocompuesto. En dichas curvas se observa que:

- Salvo en el caso de la geomembrana de menor rugosidad a 25 kPa de tensión normal, las demás presentan tensión tangencial de pico y post-pico, siendo el reblandecimiento tanto más acusado cuanto mayor es la tensión normal actuante.
- El tamaño de la rugosidad influye incrementando las resistencias de pico y post-pico, así como el reblandecimiento post-rotura que experimenta la interfaz.
- La resistencia de pico, que presentan las curvas correspondientes a la geomembrana de rugosidad inferior a 1 mm, se incrementan paulatinamente con la tensión normal aplicada, de forma prácticamente lineal. Esto no sucede cuando la rugosidad de la geomembrana es superior a 1 mm. Se aprecia un claro cambio del comportamiento para tensiones de bajo valor (25, 50 kPa) respecto al que resulta con la tensión mayor (100 kPa). El incremento de resistencia entre 50 y 100 kPa es unas nueve veces el observado entre 25 y 50 kPa.
- Los resultados de resistencia de pico y post-pico son inferiores a los que se han observado en la interfaz geomembrana/geotextil del apartado 3.3 (alrededor de un 30% con macrotextura superior a 1 mm y de un 20% en la de menor tamaño de rugosidad). La excepción corresponde a la respuesta de la interfaz entre el geocompuesto y la geomembrana de macrorugosidad mayor a 1 mm, a tensión de 100 kPa, cuya resistencia es similar.

De todas las observaciones anteriores, se deduce la existencia de fenómenos de interacción de cierta complejidad, en los que pueden intervenir no sólo en geotextil y la geomembrana en contacto, sino también la geored interna del geocompuesto.

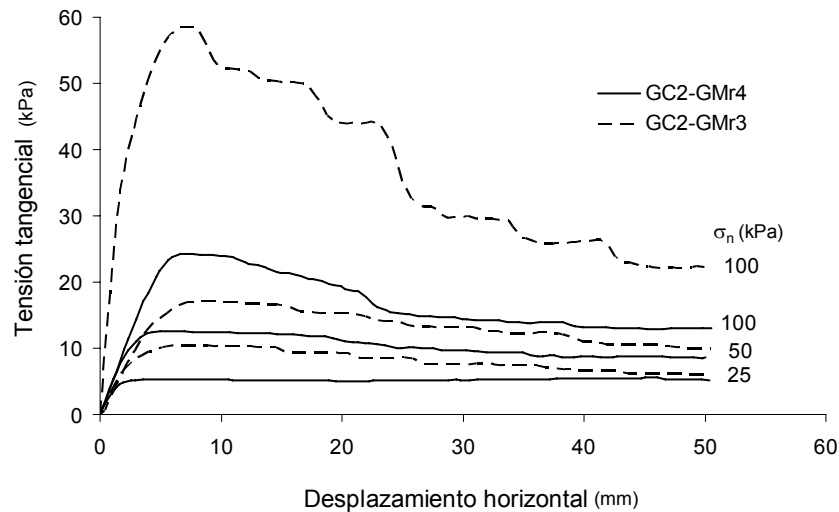


Figura 3.34 Comportamiento resistente de la interfaz geomembrana/geocompuesto

En la Figura 3.35 se presenta un esquema de los diferentes mecanismos de interacción que suceden durante el corte de la interfaz.

La Figura 3.35(a) representa el mecanismo de interacción para valores de tensiones normales inferiores del rango estudiado. Las rugosidades apenas se introducen en el geotextil del geocompuesto. Las fibras individuales se enredan y se enganchan con las rugosidades, y la fricción se produce entre el geotextil y las rugosidades de la geomembrana a nivel superficial.

Para valores intermedios de la tensión normal, el mecanismo de interacción viene representado en la Figura 3.35(b). En este caso, las rugosidades se introducen más profundamente en el geotextil, aumenta la imbricación, la resistencia de pico se debe a la suma del rozamiento a nivel de matriz del geotextil y a la resistencia al arrancamiento y rotura de las fibras enredadas y enganchadas en las rugosidades.

Para tensiones normales en el entorno del extremo superior del rango ensayado, los mecanismos de interacción responden al esquema de la Figura 3.35(c). Adicionalmente a los fenómenos de interacción descritos en el esquema b), la geored se incrusta en el geotextil, y éste se deforma adquiriendo la forma de las varillas que constituyen la geored. Las rugosidades de la geomembrana se introducen en las cavidades existentes

entre las varillas, fenómeno de interacción tanto más acusado cuanto mayor es el tamaño de la rugosidad. Por esta razón, durante el desplazamiento de la geomembrana respecto al geocompuesto, las rugosidades deben superar las varillas que se va encontrando, y es en estas zonas de contacto donde mayor fricción se produce. La geored incide a través del geotextil en la geomembrana causando el pulido, desgaste, aplastamiento y doblado de las rugosidades durante el corte, esto provoca una pérdida de tensión tangencial post-pico, tanto más acusada cuanto mayor es la tensión normal aplicada, y mayor sea el tamaño de la macrotextura de la geomembrana.

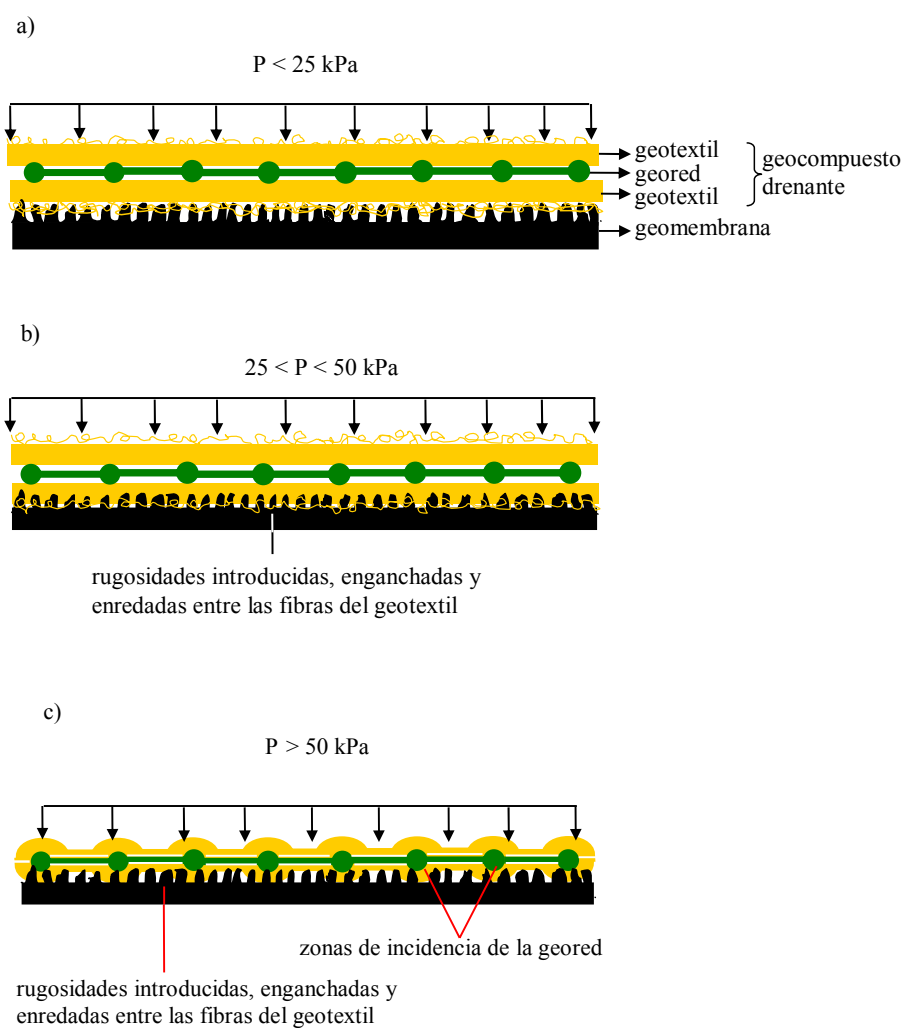


Figura 3.35 Mecanismos de interacción de la interfaz geomembrana rugosa/geocompuesto drenante.

3.4.2 Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz

Efecto de la existencia de rugosidad

En la Figura 3.36 se comparan, para un determinado geocompuesto drenante (GC1), las envolventes de rotura de las interfaces con geomembrana lisa (GMI) y rugosa (GMr1). Puede observarse que:

- La interfaz con geomembrana lisa no presenta reblandecimiento post-rotura, independientemente del valor de la tensión aplicada. Por el contrario, este fenómeno se acusa claramente cuando la geomembrana utilizada es rugosa. La razón de este comportamiento se encuentra en la imbricación entre las rugosidades de la geomembrana y el geocompuesto, en el desgaste y aplastamiento de los elementos rugosos así como en la rotura y deshilachado de las fibras del geotextil a lo largo del ensayo.
- La resistencia de pico y post-pico se incrementa en un 275% y 140%, respectivamente, en el caso de la geomembrana rugosa respecto a la geomembrana lisa.
- Este comportamiento es similar al de la interfaz geotextil/geomembrana.

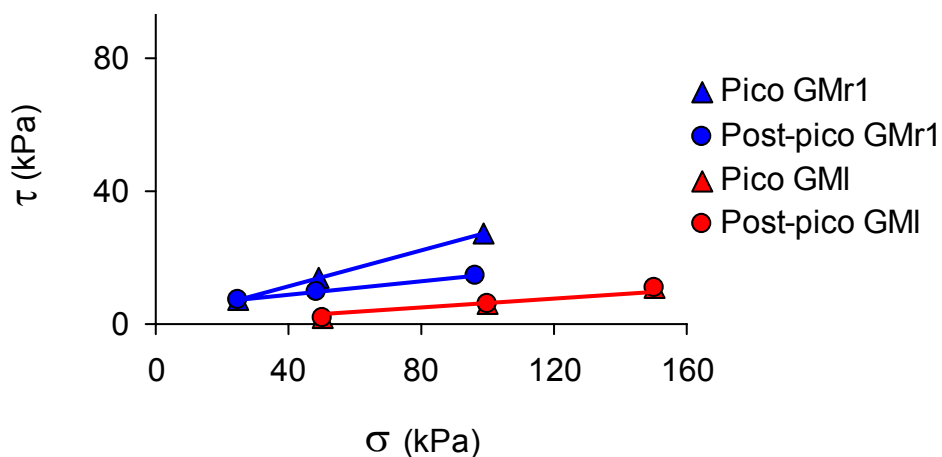


Figura 3.36 Comparación envolventes de rotura geomembrana lisa y rugosa

Efecto del tamaño de la macrotextura

La Figura 3.37 y Figura 3.39 muestran el conjunto de resultados obtenidos para las interfaces geocompuesto/geomembrana rugosa ensayadas. En ellas se aprecia el efecto del tamaño de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de dichos contactos. Se puede observar que las geomembranas GMr2_s1 y GMr3, cuya

macrotextura es de tamaño superior a 1 mm, presentan envolventes de pico superiores al resto de geomembranas, las cuales muestran envolventes de rotura de pico similares entre sí. En el rango inferior a 75 kPa, la resistencia al corte de las primeras es del orden del 60% del de las geomembranas de rugosidad inferior a 1 mm para ambos geocompuestos ensayados.

Sin embargo, la resistencia post-pico es similar para todo tipo de geomembrana ensayada, en el rango inferior a 75 kPa. Esto supone un mayor reblandecimiento de las geomembranas con rugosidades mayores a 1 mm. Dicha reducción de resistencia se achaca a los daños producidos en las fibras del geotextil y en las rugosidades a lo largo del ensayo, que ya han sido comentados.

Se observa que la interfaz GMr3/geocompuesto muestra una envolvente de rotura bilineal. La pendiente de pico para tensiones normales mayores de 75 kPa es del orden de 3 veces superior a la correspondiente al rango de tensiones menor de 75 kPa, tanto para el geocompuesto GC1 como el GC2. En la envolvente post-pico la relación de pendientes es de 10 y 4, respectivamente. Las varillas de la geored inciden sobre las rugosidades de la geomembrana y aumenta la resistencia al deslizamiento.

En cambio, este comportamiento no está reflejado en el caso de la geomembrana GMr2_s1, aunque es similar a la GMr3 en cuanto al tamaño de sus macrorugosidades. Sin embargo existen algunas diferencias, la GMr3 tiene mayor densidad de macrorugosidad por unidad de área, es más flexible y sus rugosidades son más deformables que la GMr2_s1. Esto da lugar a que se produzca un mayor aplastamiento donde existen contactos rugosidad-varilla y una mayor incrustación de las rugosidades en los intersticios de la geored. En el desplazamiento, las rugosidades chocan lateralmente con las varillas aumentando la resistencia al corte. Es presumible que con valores mayores de tensión la geomembrana GMr2_s1 se comporte de forma similar.

Las Figura 3.38 y Figura 3.40 muestra la sensibilidad de las interfaces geomembrana/GC1 y geomembrana/GC2, respectivamente. Para tensión normal de 25 kPa, el valor de la sensibilidad es generalmente 1. Para tensiones normales superiores a 25 kPa la sensibilidad en ambos geocompuestos es superior en el caso de geomembrana con rugosidad mayor a 1 mm, variando entre 1.5 y 2.5, que la que presentan las geomembranas con rugosidad menor, cuyos valores se encuentran entre 1.5 y 1.8.

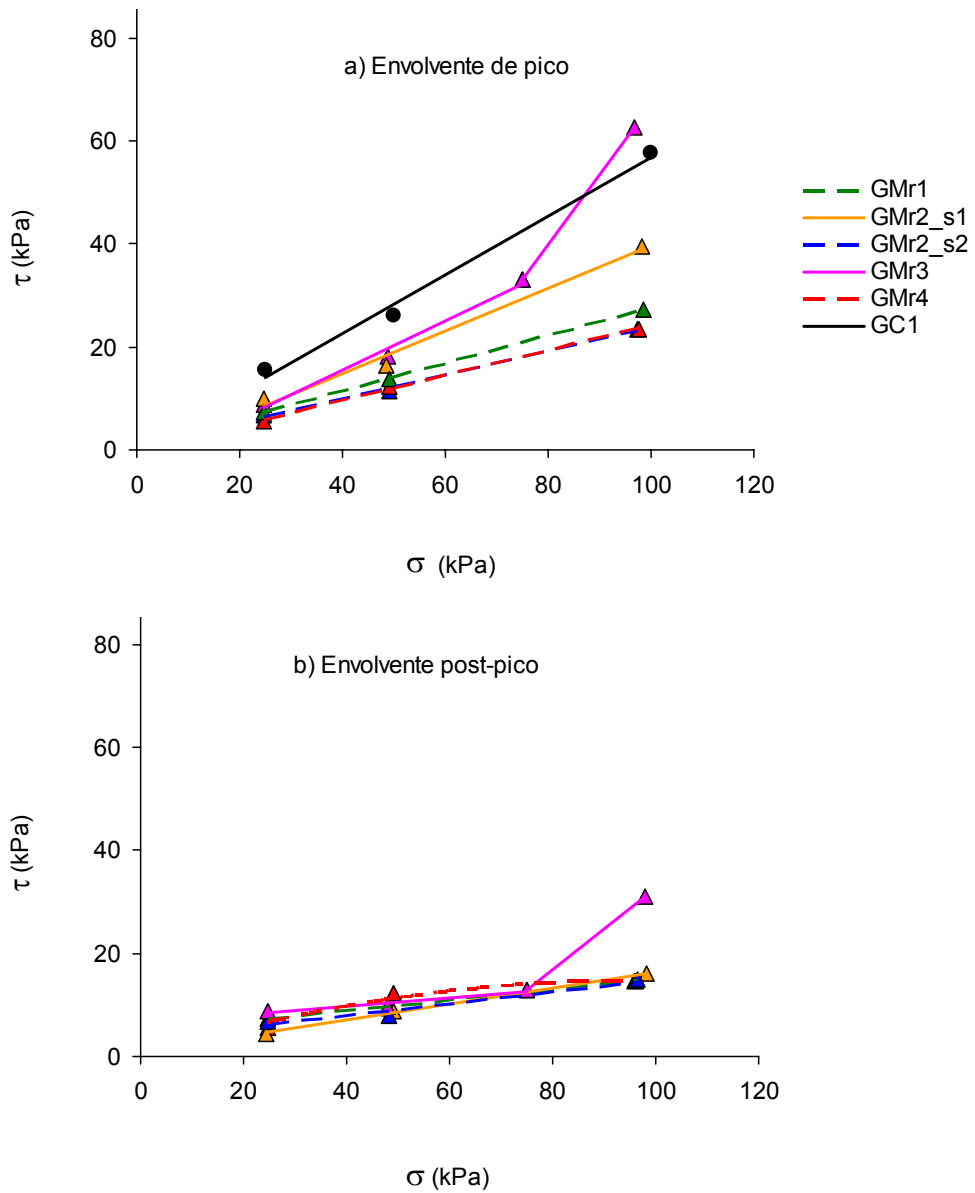


Figura 3.37 Envoltentes de rotura de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC1)

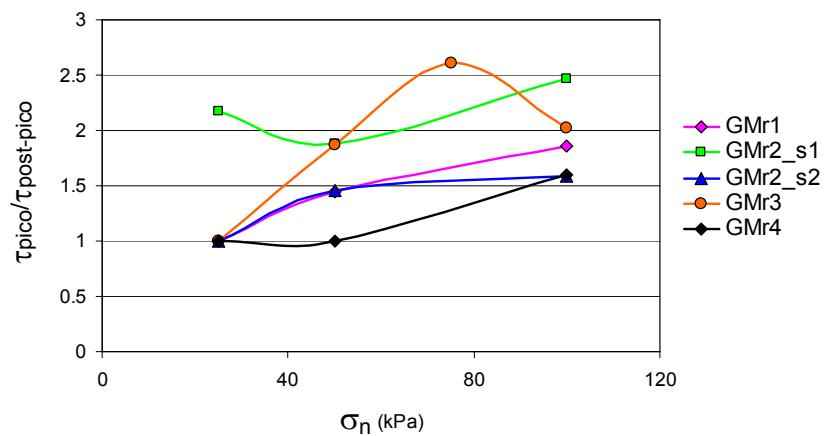


Figura 3.38 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC1)

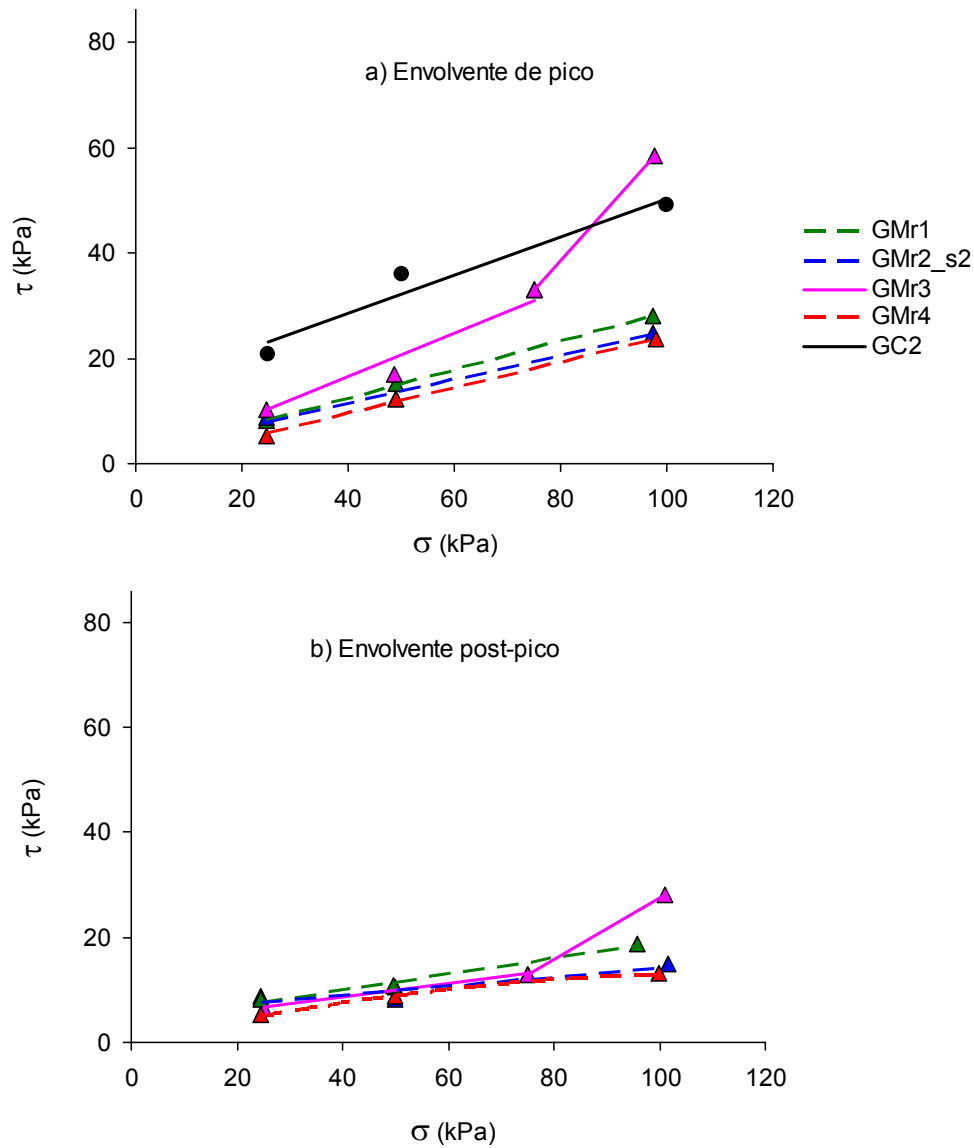


Figura 3.39 Envoltantes de rotura de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC2)

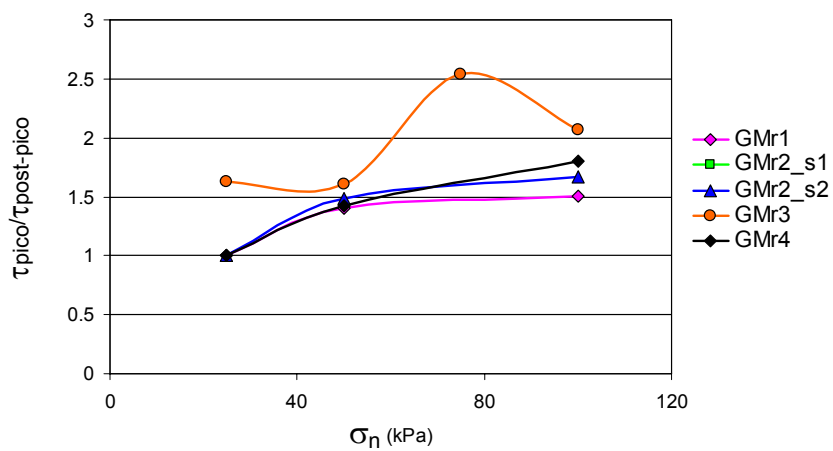


Figura 3.40 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/geocompuesto(GC2)

En la Figura 3.41 puede verse el aspecto de las muestras después de ejecutar ensayos con diversas geomembranas bajo tensión normal de 100 kPa. Se aprecia la incrustación de las varillas de la geored en el geotextil (Figura 3.41a) y los desgastes generados por el rozamiento de las varillas con los picos de las rugosidades (Figura 3.41b).

Cuando uno de los geosintéticos ensayados es un geocompuesto, bajo determinadas condiciones puede producirse la rotura al corte, no sólo en la interfaz entre geosintéticos, sino también en el interior del geocompuesto, a través de las uniones entre los diferentes materiales que constituyen dicho geosintético. Así la Figura 3.41(c) representa uno de estos casos (GMr3/GC1) donde se observa que ha ocurrido un deslizamiento relativo entre el geotextil y la geored. Para evaluar la resistencia del contacto interno y determinar en que situaciones puede aparecer esta forma de rotura, se realizaron ensayos de corte directo únicamente con los geocompuestos drenantes obligando a que el deslizamiento se produjera internamente. Las envolventes obtenidas para cada uno de los geocompuestos se representan, junto con las envolventes del resto de ensayos en las figuras Figura 3.37(a) y Figura 3.39(a). Puede verse que, cuando se trata de la geomembrana GMr3, la interfaz ensayada a tensión normal de 100 kPa proporciona mayor resistencia que la interna del geocompuesto, siendo el contacto más débil entre la geored y el geotextil.

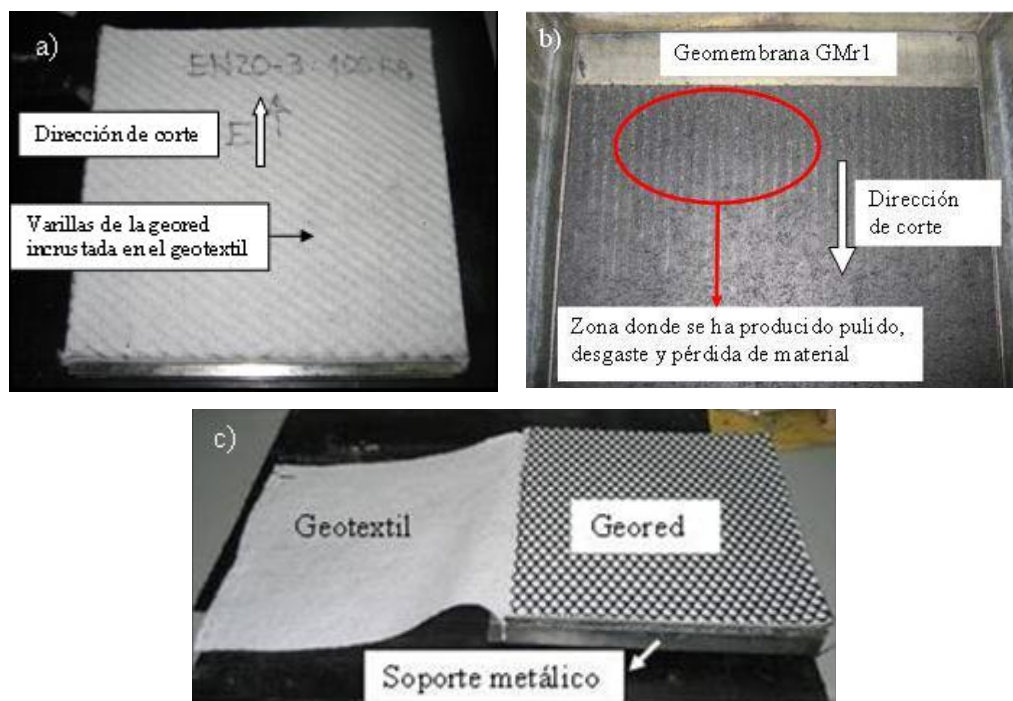


Figura 3.41 Daños que se producen en las muestras ensayadas al corte

3.4.3 Influencia de la masa por unidad de área del geotextil en contacto con la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz

De los mecanismos de interacción que pueden presentarse, es lógico deducir que la situación correspondiente a la Figura 3.35(c), con introducción de las rugosidades entre los huecos de la geored, incidiendo las varillas en dichas rugosidades, será tanto más factible de alcanzar cuanto menor sea el peso por unidad de área del geotextil que conforma el geocompuesto, requiriendo una menor tensión normal actuante.

Para comprobar este efecto, en la Figura 3.42 y Figura 3.43 se comparan las envolventes de rotura de pico y post-pico, respectivamente, de ensayos realizados entre dos geomembranas GMr1 y GMr3 y sendos geocompuestos GC1(200) y GC2(140). Ambos geocompuestos tienen el mismo tipo de geored y los geotextiles únicamente se diferencian en la masa por unidad de área. Se observa que, en todos los casos, las envolventes de rotura son muy similares, sin que se aprecie influencia de la diferencia másica en el comportamiento. Es posible que dicha diferencia sea escasa para el rango de tensiones ensayado, y que los resultados fueran diferentes si los geotextiles involucrados fueran más dispares entre sí.

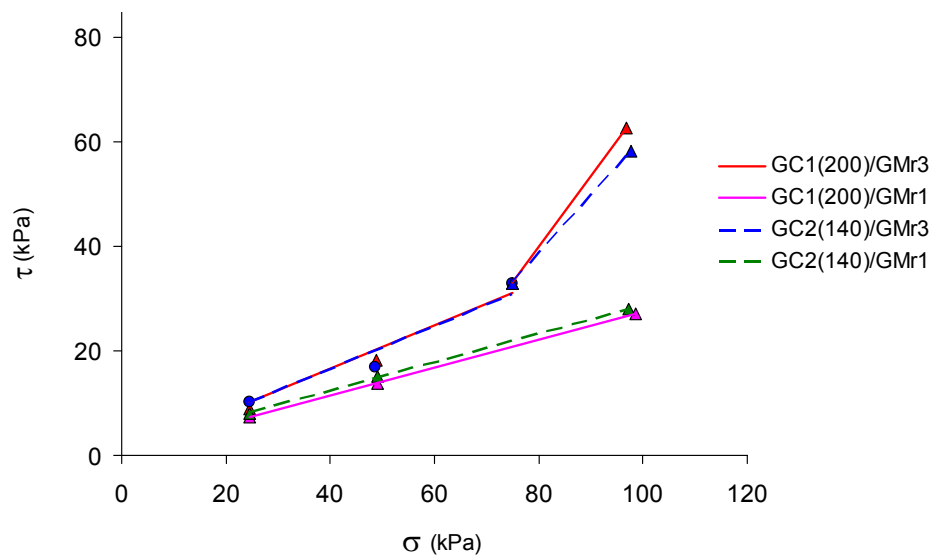


Figura 3.42 Envolventes de pico para diferente masa por unidad de área del geotextil

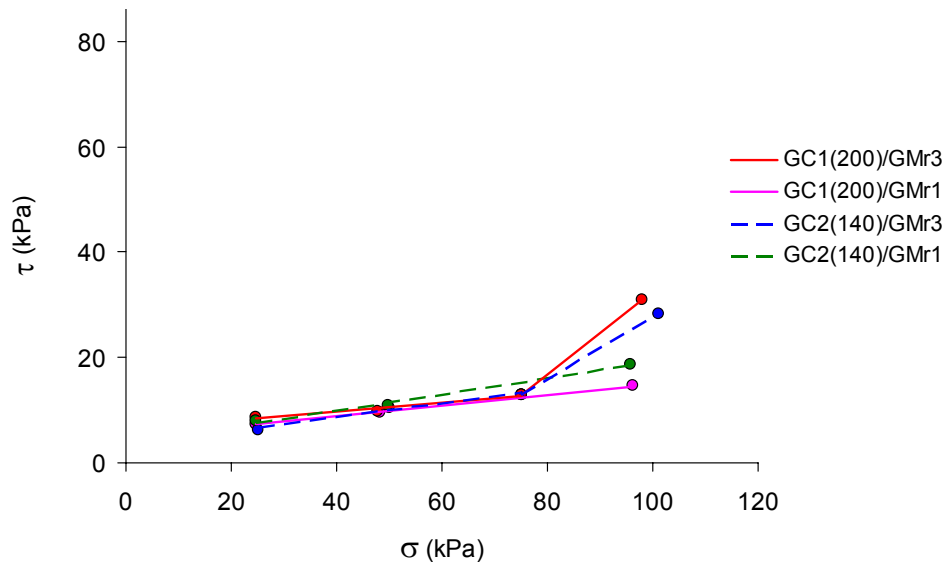


Figura 3.43 Envolventes post-pico, diferente masa por unidad de área de geotextil

3.4.4 Influencia de la geored en la resistencia al corte de la interfaz

Para analizar la influencia de la geored en el comportamiento resistente de la interfaz geomembrana/geocompuesto, se realizaron dos ensayos: uno entre el geocompuesto GC1(200) y la geomembrana rugosa GMr2_s1 y otro entre el geotextil de 200 gr/m² y la misma geomembrana. El geotextil utilizado en este último ensayo, se obtuvo del propio geocompuesto GC1, despegándolo cuidadosamente de la geored.

En la Figura 3.44 se compara las envolventes de rotura de los diferentes tipos de interfaz, se observa que el contacto geomembrana-geotextil presenta mayor resistencia que geomembrana-geocompuesto.

Esto puede explicarse analizando los mecanismos de interacción que suceden durante el corte. En el caso de la interfaz geomembrana/geocompuesto, para tensiones normales menores de 50 kPa, las fibras del geotextil en contacto con la geomembrana se enganchan y enredan en sus rugosidades. A partir la 50 kPa las varillas de la geored inciden más en el geotextil y por tanto en la geomembrana, siendo estas zonas de contacto las que mayor fricción desarrollan. Sin embargo, en la interfaz geomembrana/geotextil, el enredo y enganche de las fibras del geotextil en las rugosidades de la geomembrana corresponden a toda la superficie de contacto, generando así mayor resistencia al desplazamiento.

En cambio las envolventes de rotura post-pico son similares, hecho que podría ser debido a que en la interfaz geomembrana/geotextil, la mayoría de las fibras se rompen, se separan y se orientan paralelamente a la dirección de corte. Y en la interfaz geomembrana/geocompuesto, las fibras del geotextil se orientan en la dirección de corte, se separan y se estiran, con mayor intensidad en las zonas del geotextil donde inciden las varillas de la geored, además es en estas zonas donde se produce mayor desgaste y pulido de la superficie rugosa de la geomembrana. Por tanto en las envolventes de rotura post-pico afecta poco la existencia de la geored.

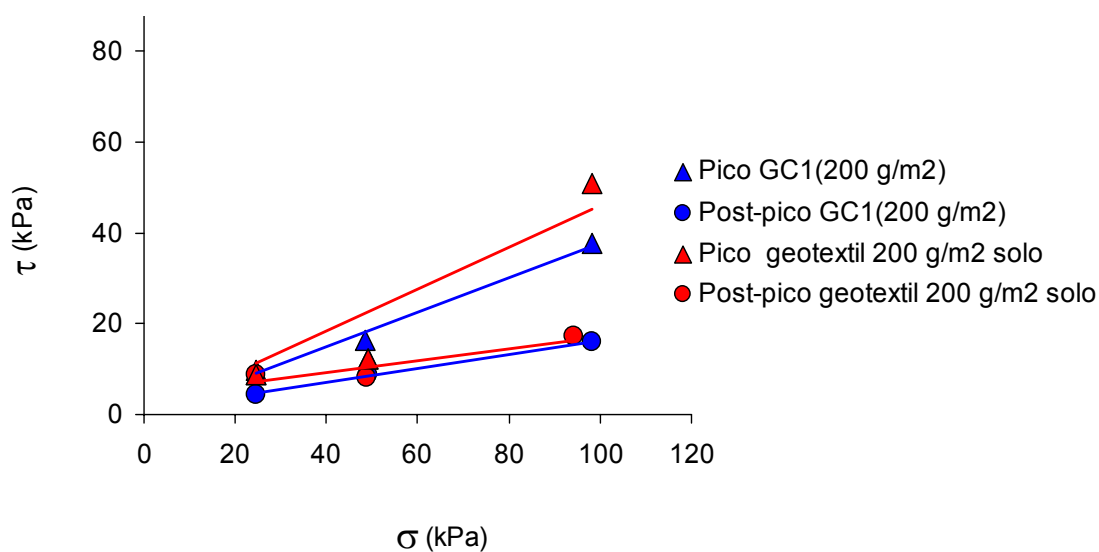


Figura 3.44 Envolventes de rotura. GMr2_s1/GC1 y GMr2_s1/geotextil

3.5 Interfaz geomembrana/suelo

Este tipo de interfaz se utiliza en la impermeabilización del vertedero. En el momento de la redacción de este documento, sólo se ha podido disponer de 9 ensayos, Tabla 3.8. Aunque se es consciente de que este número es muy reducido para poder sacar conclusiones de peso acerca del comportamiento de estas interfaces, se ha creído conveniente adjuntar diversas consideraciones en cuanto a sus mecanismos de interacción que puede servir de base a futuras investigaciones.

Las tensiones normales aplicadas han sido 100, 300 y 500 kPa, que representan la carga en base de vertedero. Se han ensayado muestras de suelo de sección cuadrada de 200 mm de lado. Se ha aplicado una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min y el desplazamiento horizontal máximo alcanzado fue de 50 mm.

El suelo1 se ha compactado estáticamente a densidad proctor modificado. Su humedad óptima corresponde a un grado de saturación del 85%. Dado que eran los ensayos iniciales de un programa más amplio, se decidió realizar los ensayos en condiciones secas, debido a que las geomembranas y el suelo compactado son muy impermeables y se requeriría mucho tiempo para lograr la saturación del contacto.

Tabla 3.8 Ensayos interfaz geomembrana/suelo

Interfaz	Ensayo seco
GMr1/suelo1	3
GMr3/suelo1	3
GMI/suelo1	3

3.5.1 Comportamiento resistente al corte de la interfaz

La Figura 3.45 muestra la relación tensión tangencial frente desplazamiento horizontal, para diversas tensiones, de la interfaz entre el suelo1 y una geomembrana lisa, correspondiendo a las curvas de trazo discontinuo, y suelo1 con geomembrana rugosa, representada por las curvas continuas. Se observa que, en ambas situaciones, la tensión tangencial aumenta hasta alcanzar un pico y disminuye a medida que se va produciendo el desplazamiento horizontal, dando lugar a un comportamiento mecánico de reblandecimiento, que se intensifica con el aumento de las tensiones normales. La tensión tangencial de pico se alcanza, para la geomembrana lisa entre 3 y 4 mm y la geomembrana rugosa entre 4 y 8 mm de desplazamiento horizontal. La resistencia post-pico es obtenida en torno a los 50 mm.

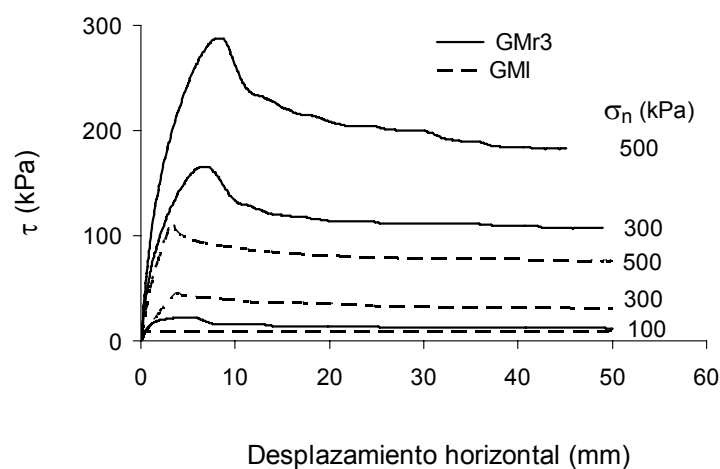


Figura 3.45 Comportamiento resistente de la interfaz geomembrana/suelo1

De los daños observados en las muestras con posterioridad al ensayo pueden deducirse los siguientes mecanismos de interacción entresuelo y geomembrana, distinguiendo según la rugosidad de ésta:

- Interacción suelo-geomembrana lisa. Como se observa en la fotografía de la Figura 3.46 la geomembrana aparece pulida, rallada e incluso con algunos surcos de longitud igual a los 50 mm de desplazamiento de ensayo, provocados por el roce con las gravas que contiene el suelo. Estos efectos se intensifican con el incremento de la tensión normal, dando lugar a una mayor reducción por desgaste de la tensión post-pico con respecto a la máxima alcanzada. En este aspecto, la sensibilidad aumenta de 1 a 1.5 tal como se puede apreciar en la Figura 3.47.

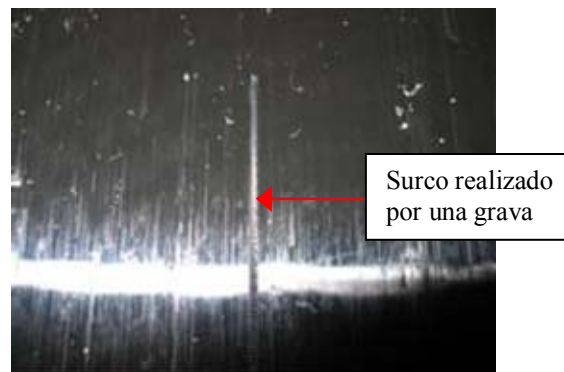


Figura 3.46 Daños producidos en la geomembrana lisa después del corte

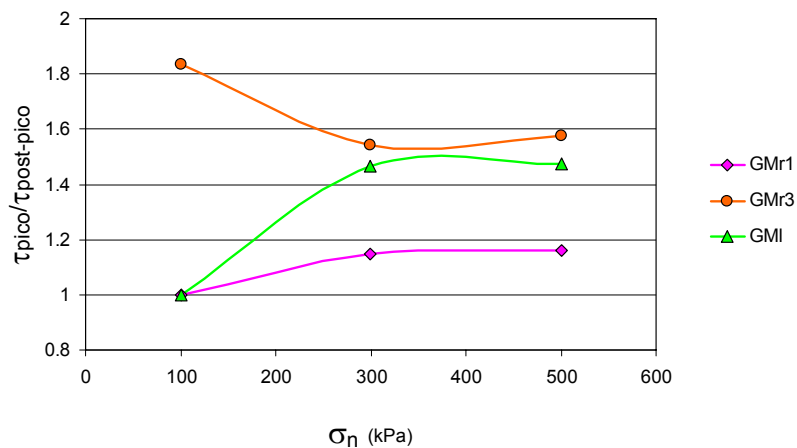


Figura 3.47 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/suelo1

- Interacción suelo-geomembrana rugosa. En este caso pueden establecerse diversas diferencias entre el mecanismo de interacción, según se trate de macrotextura regular o irregular:
 - Geomembrana con macrotextura de forma regular y mayor de 1 mm (GMr3): las macrorugosidades excavan el suelo formando unos surcos, Figura 3.48(b), por donde deslizan, acumulando así suelo entre los salientes rugosos, como se aprecia en la Figura 3.48(a). Por tanto en la resistencia al corte tiene influencia tanto el rozamiento entre la macrotextura y el suelo, como el rozamiento interno del suelo acumulado entre las rugosidades. A mayor cantidad de suelo depositado entre las rugosidades mayor resistencia. Adicionalmente, se pueden producir daños en las rugosidades, tanto mayores cuanto más elevada es la tensión normal. Así, cuando las tensiones normales son superiores a 300 kPa se observan que algunos salientes están aplastados y doblados debido a su encuentro con una o varias gravas a lo largo del corte. En este caso, la sensibilidad varía entre 1.5 y 1.8, Figura 3.47.

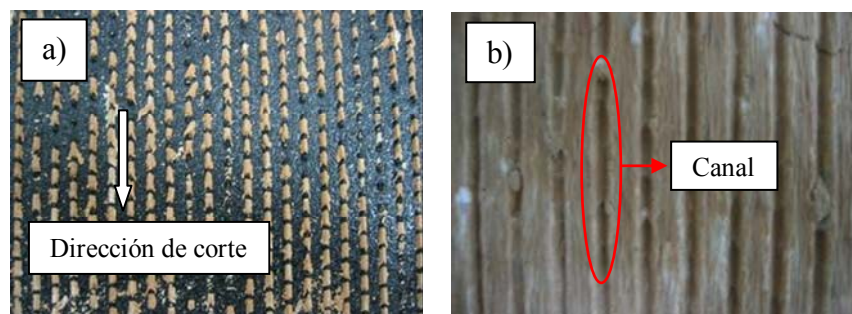


Figura 3.48 Interacción suelo-geomembrana (rugosidad mayor de 1 mm)

- Geomembrana con rugosidad de forma irregular menor de 1 mm (GMr1): las rugosidades provocan hendiduras irregulares que se extienden a toda la superficie del suelo en contacto con la geomembrana, arrastrando entre ellas una capa de suelo de superficie prácticamente igual a la de la muestra ensayada. Por tanto, en la resistencia al corte influye además del rozamiento entre rugosidad y suelo, el rozamiento interno del propio suelo en mayor medida que en el caso de la geomembrana de rugosidad regular anteriormente analizada. Para tensiones mayores de 100 kPa las gravas que contiene el suelo van puliendo la geomembrana, arrancando rugosidades a su paso,

reduciéndose así la resistencia al corte, como se observa en el valor de la sensibilidad que aumenta con la tensión normal de 1 a 1.2, Figura 3.47.

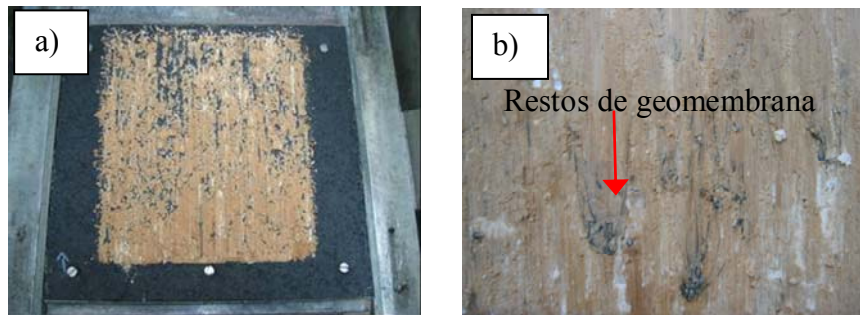


Figura 3.49 Interacción suelo1-geomembrana (rugosidad menor de 1 mm)

3.5.2 Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz

Efecto de la existencia de rugosidad

En la Figura 3.50 se comparan las envolventes de rotura de las interfaces geomembrana lisa/suelo1 y geomembrana rugosa/suelo1. Se observa que la geomembrana rugosa proporciona un incremento de la resistencia al corte de aproximadamente 160% con respecto a la geomembrana lisa.

Aun cuando no existen resultados de ensayos para tensiones inferiores a 100 kPa, parece que las envolventes de rotura de las Figura 3.50 y Figura 3.51 tienden a confluir entre sí, con una disminución de pendiente de la envolvente. Esto respondería a una situación de menor interacción entre las rugosidades y el suelo al haber menos introducción de éstas en el interior de la masa del terreno, debido a un valor de la tensión normal inferior. Este hecho tiene como respuesta un menor desgaste y reblandecimiento post-pico, y una respuesta similar entre geomembranas rugosas y lisas, lo que conlleva que la resistencia del contacto dependa mayoritariamente de la fricción entre superficies de la geomembrana y del suelo.

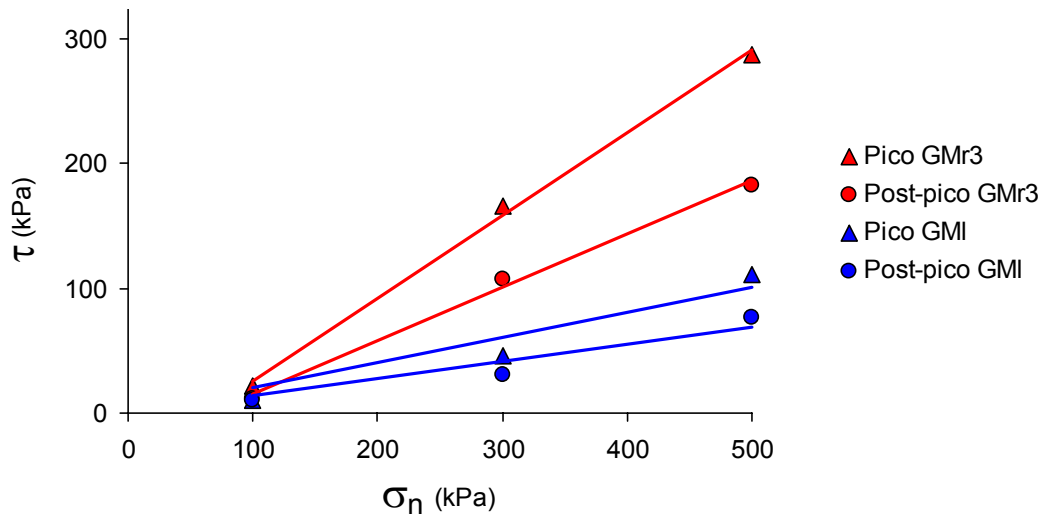


Figura 3.50 Envolventes de rotura de las interfaces geomembrana lisa/suelo1 y geomembrana rugosa/suelo1

Efecto del tamaño de la macrotextura

En la Figura 3.51 se comparan las envolventes de rotura de las interfaces: geomembrana rugosa (GMr1)/suelo1 y geomembrana rugosa (GMr3)/suelo1, con los resultados de ensayos de corte directo sobre muestras de suelo1, compactado estáticamente a densidad proctor modificado. Éste se ha ensayado en una caja de corte cuadrada de 60 mm de lado, habiendo realizado el ensayo consolidado drenado.

Se observa que las envolventes de resistencia de pico correspondientes a las geomembranas rugosas son similares, aunque su superficie rugosa y método de fabricación sean distintos. Sin embargo estas diferencias tienen una gran influencia en la envolvente de rotura post-pico, siendo mayor en el caso de la geomembrana GMr1 porque la resistencia interna del suelo tiene mayor influencia que en la GMr3, como ya se ha comentado anteriormente. Así pues la pérdida de resistencia post-pico para la GMr1 es aproximadamente del 10% y para la GMr3 del 30%.

La resistencia interna que presenta el suelo1 es mayor, tanto en tensión de pico (1.6 veces) como en post-pico (1.3 y 1.8 veces respectivamente) que la resistencia del contacto suelo-geomembrana rugosa. Esto indica que:

- El deslizamiento no se produce en el interior de la masa de suelo sino en el contacto con la geomembrana.
- La fricción entre ambos materiales es inferior al rozamiento interno del suelo.

- El mecanismo de interacción de las rugosidades, aunque aporta una resistencia complementaria, no es suficiente para alcanzar o superar la resistencia interna del terreno. El efecto arado se limita al entorno de las rugosidades, que suponen sólo una fracción de la superficie de la geomembrana. Por otra parte, el terreno levantado y arrastrado por las rugosidades pierde resistencia por remoldeo.

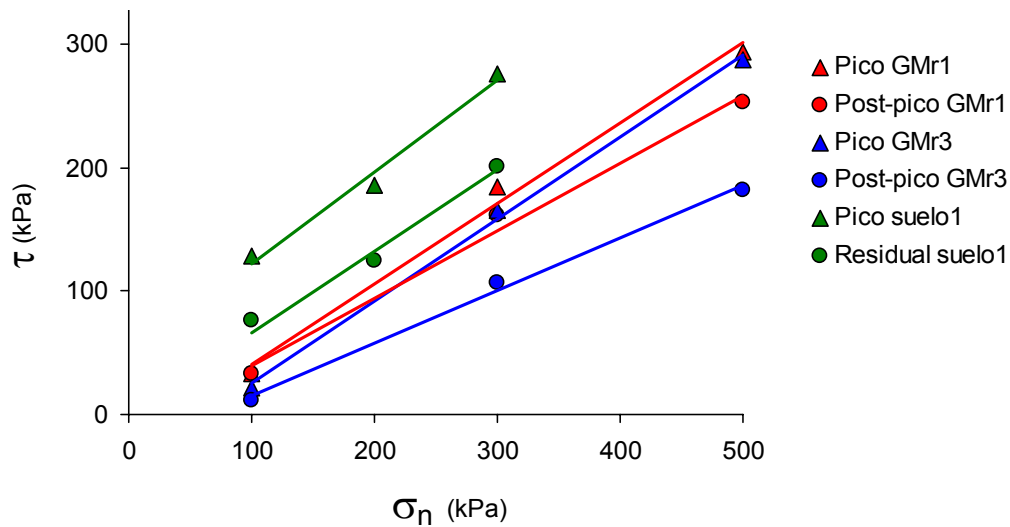


Figura 3.51 Envoltorios de rotura de las interfaces geomembrana/suelo1 y de resistencia interna del suelo1

3.6 Interfaz geotextil/suelo

Este tipo de interfaz se utiliza tanto en base como sellado de vertedero. Se han realizado un total de 15 ensayos, entre tres geotextiles y dos tipos de suelo, Tabla 3.9, aplicando tensiones normales de 25, 50 y 100 kPa, rango adecuado a las cargas existentes en el sellado. Con una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min se alcanzó un desplazamiento horizontal máximo de 50 mm.

El suelo 1 y 2 se han compactado estáticamente a densidad proctor normal. Su humedad óptima corresponde a un grado de saturación de 85%.

El ensayo en condiciones húmedas, se ha realizado inundando únicamente el geotextil, porque la saturación del suelo compactado a densidad proctor normal, sin aplicar presión de agua, requiere mucho tiempo. Se estima que lo importante es que el contacto entre el terreno y el geotextil reúna las condiciones de saturación exigidas, lo cual se

considera obtenido mediante el procedimiento seguido, independientemente de que el resto de la masa del terreno se encuentre en condiciones semisaturadas.

Al igual que sucede en el apartado anterior, el número de ensayos es pequeño, lo que sólo permite establecer algunas consideraciones sobre el comportamiento observado.

Tabla 3.9 Ensayos interfaz geotextil/suelo

Interfaz	Tipo de ensayo	
	seco	húmedo
GT4/suelo1	3	3
GT5/suelo1	3	3
GT4/suelo2	3	-

3.6.1 Comportamiento resistente al corte de la interfaz

Después de analizar los resultados y las muestras ensayadas de la interfaz geotextil/suelo se observó que el comportamiento resistente dependía fuertemente del tipo de suelo ensayado, dando lugar a diferentes mecanismos de interacción. Por ello se analiza el comportamiento resistente de la interfaz atendiendo al tipo de suelo ensayado.

En la Figura 3.52 se muestra la relación tensión tangencial frente al desplazamiento horizontal de las interfaces entre el geotextil GT4 y el suelo 1 y 2. Las curvas discontinuas pertenecen al suelo1, y las continuas al suelo2.

Ensayo realizado con el suelo1 (suelo arcilloso con un 5% de gruesos)

La tensión tangencial llega a su valor de pico y después se mantiene aproximadamente constante. La fricción se debe a que las partículas de suelo se introducen entre las fibras del geotextil y éstas se imbrican en la superficie del suelo. Si las partículas son finas no tienen capacidad para producir el deterioro de las fibras del geotextil, por ello no se aprecia pérdida de resistencia. En la curva correspondiente a la tensión normal de 100 kPa, se observa que a partir de 25 mm se produce un incremento de la tensión tangencial, posiblemente debido al enganche de las fibras del geotextil con alguna grava que contiene el suelo.

Ensayo realizado con el suelo2 (suelo arcilloso con un 15% de gruesos)

Para todas las tensiones normales de ensayo, la tensión tangencial aumenta hasta el valor de pico y luego desciende a un valor post-pico, mostrando un comportamiento mecánico de reblandecimiento. Las partículas gruesas del suelo se enganchan y enredan entre las fibras del geotextil aumentando así la resistencia al corte. A medida que

aumenta el desplazamiento horizontal los gruesos inciden sobre las fibras, y éstas se estiran, se separan, y se rompen disminuyendo así la resistencia al corte. Este efecto es tanto más acusado cuanto mayor es la tensión normal aplicada, como muestra la Figura 3.53, donde la sensibilidad correspondiente a esta interfaz aumenta de 1 a 1.4.

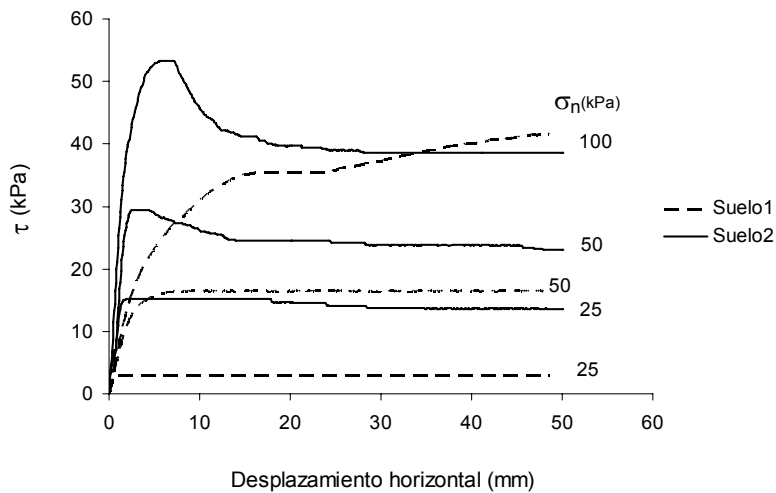


Figura 3.52 Comportamiento de la interfaz geotextil/suelo en condiciones secas

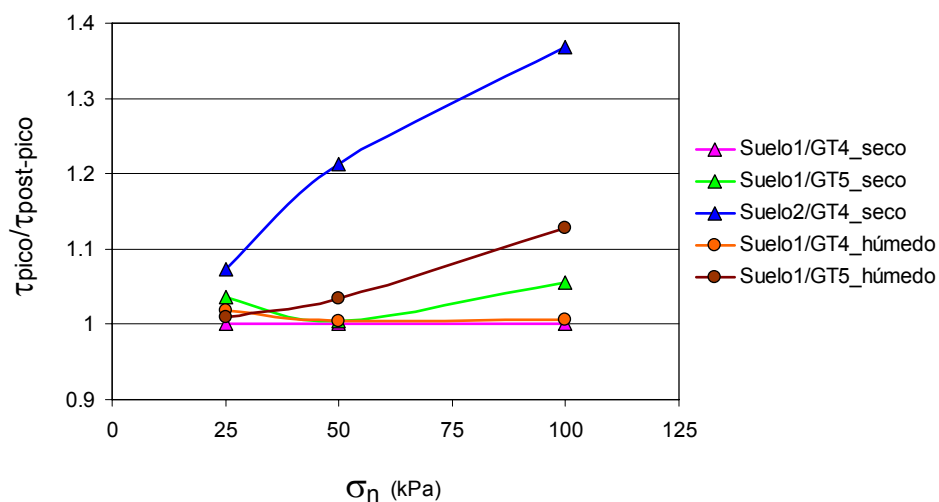


Figura 3.53 Sensibilidad de la interfaz geotextil/suelo

3.6.2 Influencia del tipo de suelo en la resistencia al corte de la interfaz

En la Figura 3.54 se presentan las envolventes de rotura de dos interfaces, GT4/suelo1 y GT4/suelo2, en condiciones secas. Como resultado de estos ensayos se puede deducir que cuánto mayor cantidad de gruesos contenga un suelo mayor resistencia de pico y

pérdida posterior de resistencia proporcionará. El suelo arcilloso con pocos gruesos ensayado no presenta apenas pérdida de resistencia post-pico.

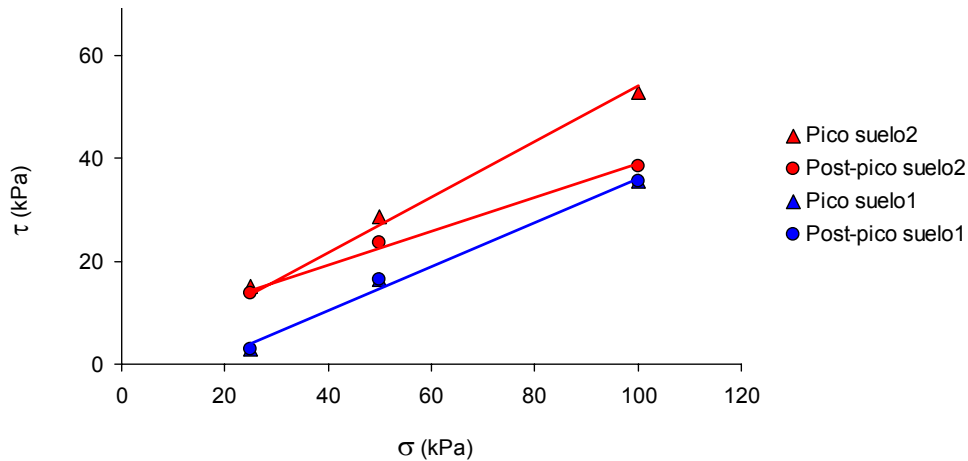


Figura 3.54 Envolventes de rotura geotextil/suelo(1 y 2)

3.6.3 Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz

En la Figura 3.55 y Figura 3.56 se comparan las envolventes de rotura para las interfaces entre el suelo1 y los geotextiles GT4 y GT5, respectivamente, tanto en condiciones secas como húmedas. Se observa que ambos tipos de ensayos proporcionan resistencias similares, para valores bajos de tensión normal. El geotextil es muy permeable, lo que permite el drenaje rápido y favorece la rápida disipación de las presiones intersticiales generadas durante el ensayo.

Sin embargo, para valores altos del rango de tensión normal ensayado, la resistencia que proporcionan los ensayos realizados en condiciones húmedas es ligeramente superior a la de los ensayos en condiciones secas.

Se observa, al examinar las muestras después del ensayo, que las partículas de suelo tienen tendencia a introducirse en el geotextil, intercalándose entre sus fibras. Esta tendencia es tanto mayor cuanto más elevado es el valor de la tensión normal.

En las fotografías de la Figura 3.57 se aprecia una mayor cantidad de suelo adherido al geotextil en el ensayo húmedo. Este efecto puede ser debido a un reblandecimiento de la superficie del suelo producido por el agua existente en el contacto, lo que se traduce en una mayor facilidad de penetración de las partículas en el geotextil. Dicha inserción da

lugar a que el corte se produzca no sólo entre fibra y suelo, sino también entre las partículas de suelo adherido y el resto, incrementándose la resistencia del contacto, tanto más cuanto mayor es la cantidad de material introducido entre las fibras del geotextil.

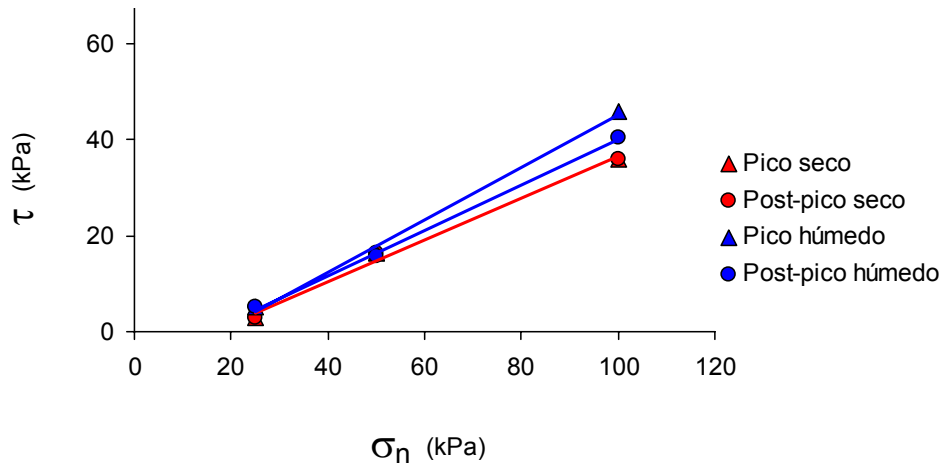


Figura 3.55 Envolventes de la interfaz GT4/suelo1. Condiciones húmedas y secas

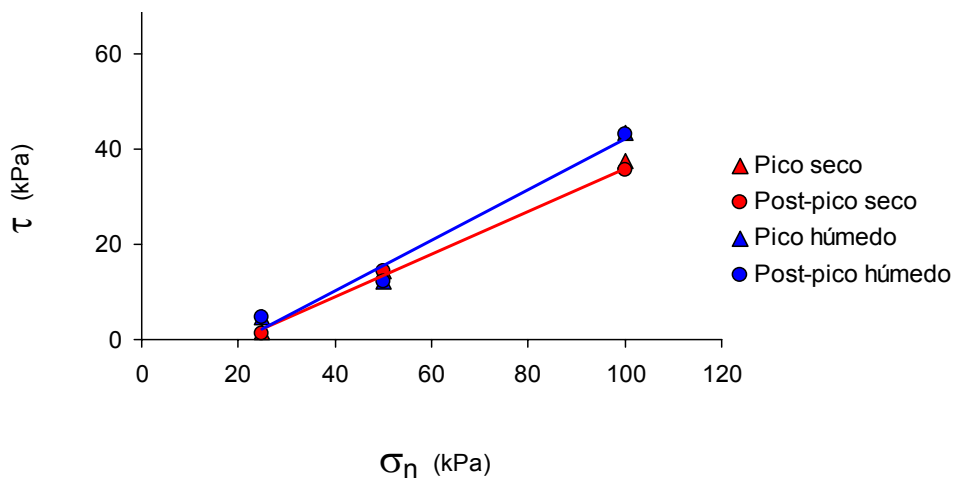


Figura 3.56 Envolventes de la interfaz GT5/suelo1. Condiciones húmedas y secas

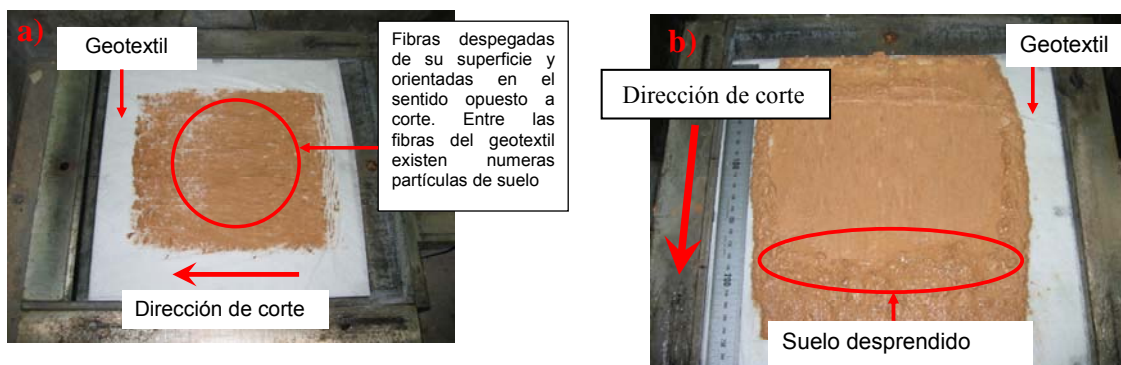


Figura 3.57 Muestras después del ensayo de corte directo. Foto a) en condiciones secas. Foto b) en condiciones húmedas

3.6.4 Influencia del tipo de geotextil en la resistencia al corte de la interfaz

La Figura 3.58 muestra una comparación de las envolventes de rotura con los dos tipos de geotextil ensayados con el suelo1. El geotextil GT4 está formado por filamentos continuos unidos térmicamente y el geotextil GT5 está compuesto de fibras cortas agujeteadas. Se observa que ambas interfaces GT4/suelo1 y GT5/suelo1 dan envolventes de rotura similares. No parece, por tanto, que el tipo de fibra y método de fabricación del geotextil tenga una influencia concluyente en la resistencia al corte de la interfaz, al menos en el rango de tensiones ensayado.

En la misma figura se presenta la envolvente de rotura del suelo1, ensayado en caja de corte cuadrada de 60 mm de lado, y compactado estáticamente a densidad proctor normal. El ensayo se estableció en condiciones consolidadas drenadas. Se observa que las envolventes pertenecientes a las interfaces están por debajo de la envolvente de rotura del suelo. Comprobando así que el plano de deslizamiento se produce entre el geotextil y el suelo.

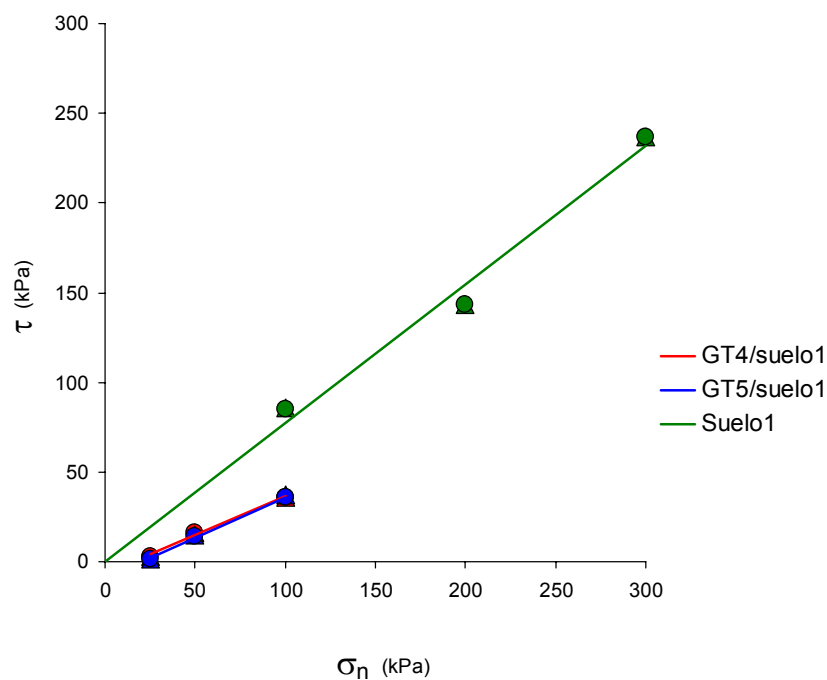


Figura 3.58 Envolventes rotura para dos tipos de geotextil e interna del suelo.

3.7 Interfaz geomembrana/Geosynthetic Clay Liner

El sistema geomembrana/GCL se utiliza principalmente para la impermeabilización del vaso de vertedero. En adición a la impermeabilidad de la geomembrana, la GCL contiene bentonita entre los geotextiles laterales, ésta tiene un gran poder absorbente de líquidos que incrementan su volumen y reducen su coeficiente de permeabilidad.

En el momento de la redacción de este documento, se ha dispuesto de 17 ensayos de corte directo, realizados con tres tipos de geomembrana y una GCL, ensayada por el lado del geotextil no tejido (Tabla 3.10). El rango de tensiones normales aplicadas ha sido entre 50 y 500 kPa. La velocidad de desplazamiento ha sido de 5 mm/min en los ensayos realizados en condiciones secas, y 0.055 mm/min en los ensayos húmedos. El desplazamiento horizontal máximo alcanzado fue de 50 mm.

Tabla 3.10 Ensayos geomembrana/GCL

Interfaz	Tipo de ensayo	
	seco	húmedo
GMr1/GCLnw*	3	-
GMr3/GCLnw*	4	4
GMI/GCLnw*	3	3

*GCLnw ensayada por el lado del geotextil no tejido

3.7.1 Comportamiento resistente al corte de la interfaz

Las condiciones de humedad en el ensayo repercuten enormemente en los mecanismos de interacción entre la geomembrana y la GCL, por lo tanto también en la resistencia al corte de la interfaz. Por ello se analiza el comportamiento resistente de la interfaz diferenciando entre condiciones secas y húmedas.

Ensayo realizado en condiciones secas

La Figura 3.59 muestra las curvas tensión tangencial frente al desplazamiento horizontal del ensayo de la interfaz geomembrana rugosa(GMr3)/GCL en condiciones secas.

- Para tensiones mayores o igual a 100 kPa, las curvas ascienden hasta alcanzar la tensión tangencial de pico, entre 5 y 9 mm de desplazamiento horizontal, y a continuación descienden presentando varios escalones de anchura igual a la separación entre las macrotexturas, 5 a 6 mm. El fenómeno es similar al que presentaba la interfaz geotextil/geomembrana rugosa, cuando esta última era la GMr3 (Figura 3.15). En este caso la pérdida sucesiva de resistencia post-

pico se concentra en los primeros 25 mm de desplazamiento horizontal, y seguidamente la pendiente media de la curva es casi horizontal. El geotextil de la GCL es de mucho menor espesor que el ensayado en la interfaz geomembrana/geotextil, y es lógico que la rotura y separación de las fibras se produzca antes.

Por otra parte, en las curvas se reflejan pequeñas elevaciones debidas a incrementos ligeros de resistencia, que aportan un aspecto sinusoidal. Este comportamiento está relacionado con las deformaciones sobre la GCL producidas por las rugosidades de la geomembrana durante la aplicación de la carga normal. Los salientes se imbrican en la GCL, haciendo que en su superficie se formen cráteres donde las rugosidades se sitúan (Figura 3.60). Durante el corte las rugosidades van saliendo e introduciéndose en los cráteres paulatinamente (Figura 3.61). Esto produce pequeñas dilataciones y contracción que se reflejan en la resistencia al corte mediante las ondulaciones observadas.

- En el caso de tensiones verticales de 50 kPa son visibles los escalones pero no el comportamiento ondulatorio. Los salientes o macrotextura de la geomembrana no llegan a imbricarse del todo en la matriz del geotextil, y la fricción ocurre a nivel superficial.

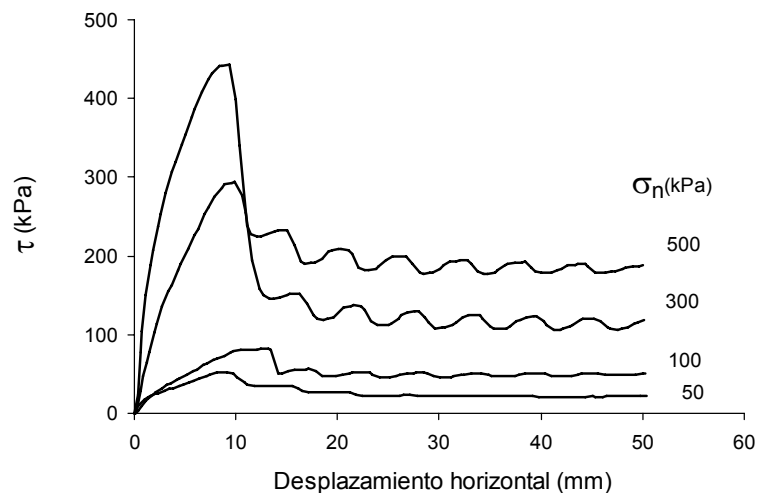


Figura 3.59 Comportamiento al corte de la interfaz GMr3/GCL. Condiciones secas

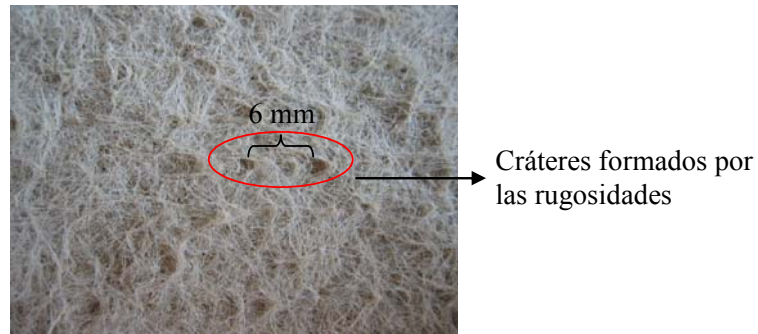


Figura 3.60 Huellas en la superficie de la GCL

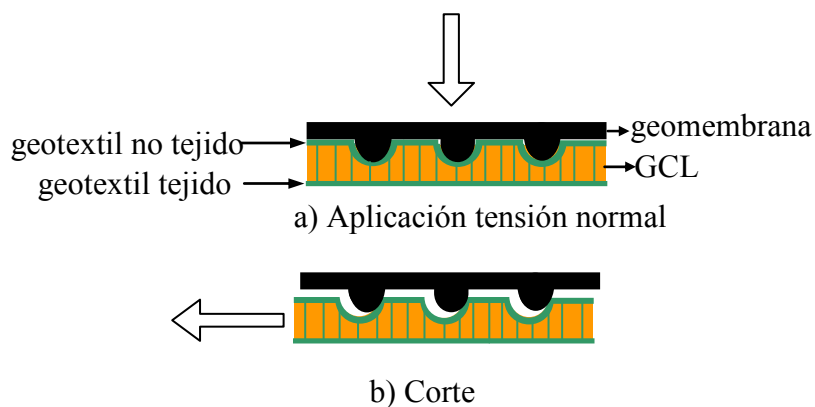


Figura 3.61 Mecanismo interacción geomembrana/GCL

De la observación posterior de las muestras, se deduce que el plano de corte se produce para todo el rango de tensiones ensayado entre la geomembrana y el geotextil no tejido de la GCL, sin producirse rotura en el interior de esta última.

Por otra parte, la pérdida de resistencia post-pico, se debe principalmente a que las fibras del geotextil de la GCL en contacto con la geomembrana, se estiran, se separan y se orientan paralelamente a la dirección de corte, ver Figura 3.62a), disminuyendo de esta manera su fricción con las rugosidades. Y con tensiones superiores a 100 kPa se ha observado el pulido y aplastamiento de las rugosidades de la geomembrana, que también contribuye a la pérdida de resistencia tangencial de la interfaz.

Estos mecanismos de interacción son similares a los del contacto geomembrana rugosa/geotextil, por tanto la interfaz geomembrana/GCL tiene valores parecidos de sensibilidad a aquél, entre 1.8 y 2.5, como así se muestra en la Figura 3.63.

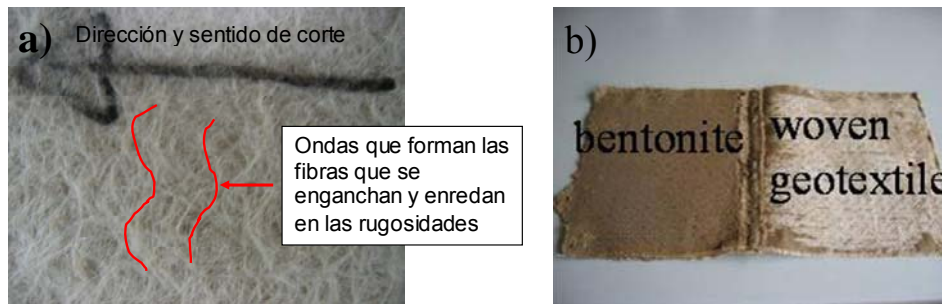


Figura 3.62 Muestra de GCL ensayada: a) ensayo en condiciones secas b) ensayo en condiciones húmedas

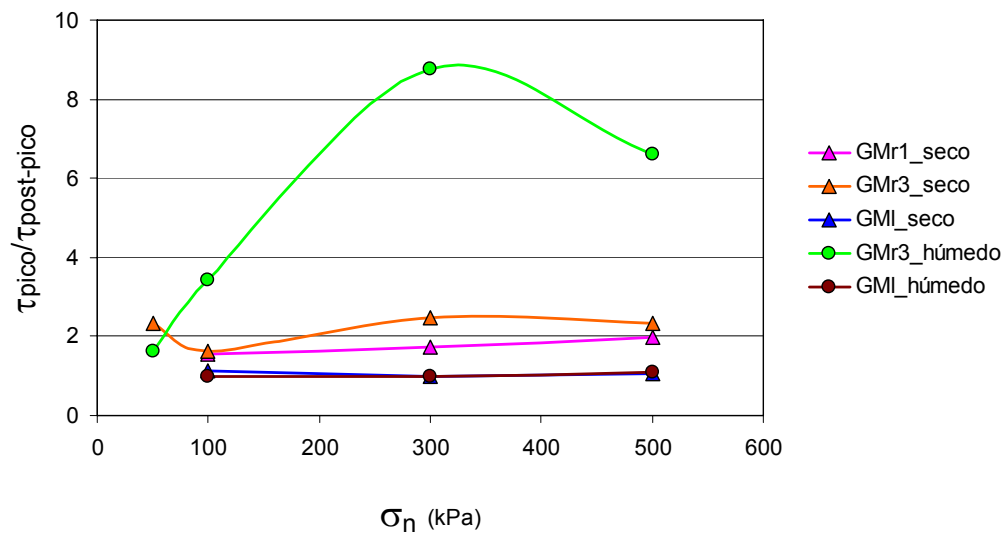


Figura 3.63 Sensibilidad de la interfaz geomembrana/GCL

Ensayo realizado en condiciones húmedas

La Figura 3.64 muestra los resultados de los ensayos de corte de la interfaz entre la GCL y la geomembrana rugosa GMr3 en condiciones húmedas. De las curvas obtenidas, de la observación de las muestras posterior al ensayo, y del comportamiento resistente interno de la GCL (apartado 3.9) se deduce que:

- Para tensiones normales mayores o igual a 100 kPa, las curvas ascienden hasta el valor de la tensión tangencial de pico, que se alcanza entre 5 y 9 mm de desplazamiento horizontal, y desciende bruscamente hasta su valor post-pico obtenido alrededor de los 50 mm. Para este rango de tensiones normales el plano de rotura se produce en el interior de la GCL, correspondiendo el valor de pico al momento en el que se rompen la mayoría de las fibras de refuerzo de la GCL, Figura 3.5, y el valor post-pico al rozamiento de la capa de bentonita con el geotextil tejido de la GCL, Figura 3.62b). Las condiciones de

humedad de la GCL reducen fuertemente su resistencia interna respecto a la situación de ensayo en condiciones secas, siendo el contacto interno bentonita-geotextil tejido el más débil. Como la imbricación de la rugosidad de la geomembrana con el geotextil no tejido proporciona resistencias superiores a la máxima que puede aportar internamente la GCL, la rotura se produce en su interior. La sensibilidad en estas condiciones es muy elevada variando entre 4 y 8 aproximadamente, Figura 3.63.

- Para tensión normal de 50 kPa, la curva llega a un valor de pico, relativamente elevado en relación con las restantes resultados, descendiendo suavemente hacia el valor de post-pico. El plano de corte se produce entre la geomembrana y la GCL, debido a que la imbricación entre geomembrana y geotextil no tejido es menor, siendo la resistencia de este contacto menor que la interna de la GCL. Por tanto la resistencia al corte se debe mayoritariamente al enredo y enganche de las fibras del geotextil entre las rugosidades de la geomembrana. Puede influir también en dicha resistencia que parte de la bentonita traspasa el geotextil no tejido y produce un efecto lubricado del contacto.

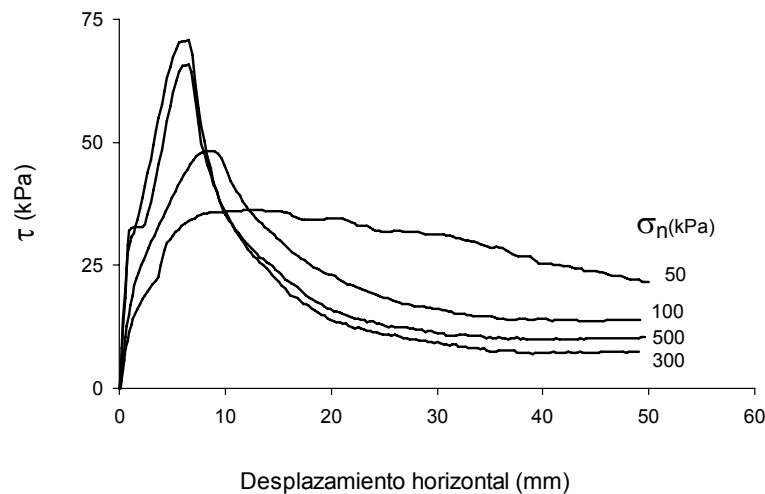


Figura 3.64 Comportamiento de la interfaz GMr3/GCL. Condiciones húmedas

3.7.2 Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz

En la Figura 3.65 se presentan las envolventes de rotura correspondientes a los ensayos anteriormente analizados, interfaz GMr3/GCL, en condiciones secas y húmedas. Conforme a los mecanismos de rotura y comportamiento resistente descritos antes, la resistencia obtenida en el ensayo seco es superior al ensayo húmedo. La pérdida de resistencia post-pico, para tensiones normales bajas es similar en ambos casos, en torno al 50%, en cambio para tensiones normales medias y altas, en condiciones húmedas puede llegar hasta el 95%, y en condiciones secas es aproximadamente el 50%.

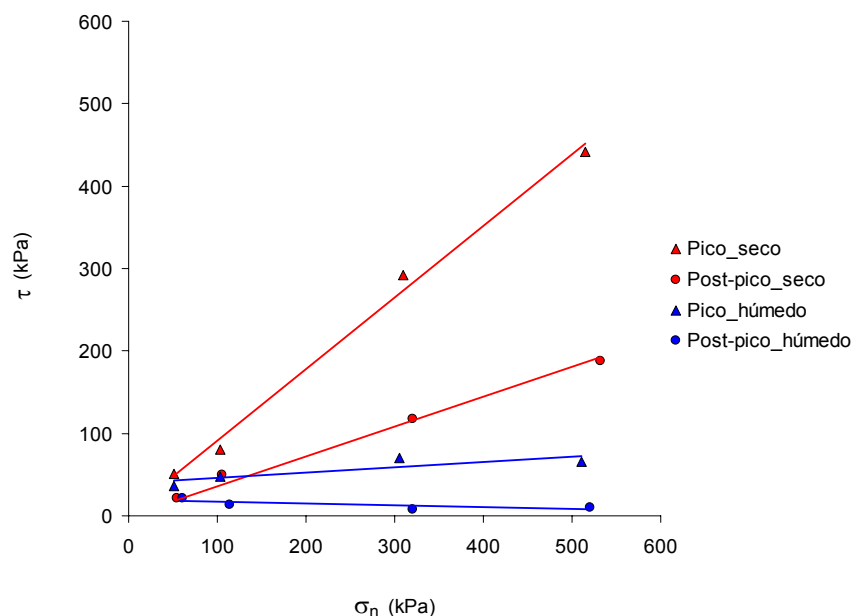


Figura 3.65 Envolventes de rotura de la interfaz GMr3/GCL

3.7.3 Influencia de la rugosidad de la geomembrana en la resistencia al corte de la interfaz

Efecto de la existencia de rugosidad

La Figura 3.66 presenta una comparación de las envolventes de rotura entre las interfaces con geomembrana rugosa y lisa (GMr3 y GMI)/GCL junto con la envolvente que corresponde a la resistencia interna de la GCL (apartado 3.9). En el caso de los ensayos realizados en condiciones secas, Figura 3.66a), la geomembrana rugosa implica un incremento de la resistencia de pico y post-pico de aproximadamente 500% y 170%, respectivamente. La pérdida de resistencia de pico es substancialmente mayor con la geomembrana rugosa, debido a los mecanismos de rotura explicados anteriormente. En

esta figura se aprecia también que el plano de rotura sucede siempre entre la geomembrana y el geotextil no tejido de la GCL, ya que la resistencia interna de la GCL es bastante superior.

La Figura 3.66b) muestra las envolventes de rotura de las interfaces con geomembrana rugosa y lisa (GMr3 y GMI)/GCL en condiciones húmedas. El resultado con la geomembrana rugosa incrementa la resistencia de pico aproximadamente un 100% respecto de la lisa. Sin embargo las envolventes de rotura post-pico son similares en ambos tipos de interfaces. Las envolventes de rotura de pico y post-pico de la interfaz geomembrana rugosa/GCL y GCL ensayada sola son similares, indicando que el plano de deslizamiento se produce en el interior de la GCL. Sin embargo con la interfaz GMI/GCL el plano de corte se produce siempre entre la geomembrana y la GCL.

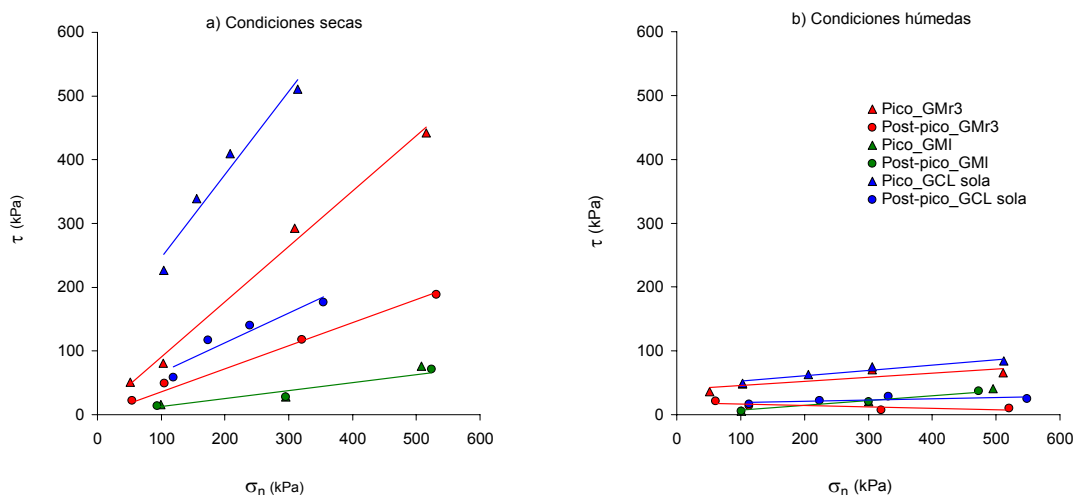


Figura 3.66 Envolventes de rotura geomembrana/GCL y GCL sola: (a) en condiciones secas y (b) húmedas

Efecto del tamaño de la macrotextura de la geomembrana

El análisis únicamente ha podido realizarse en condiciones secas pues para la geomembrana GMr1 sólo se ha dispuesto de ensayos en esta situación.

La Figura 3.67 compara las envolventes de rotura de las interfaces entre la GCL y la geomembrana con rugosidades menores de 1 mm (GMr1) y la geomembrana con rugosidad mayor de 1 mm (GMr3). La mayor resistencia al corte de pico se obtiene con la geomembrana GMr3 y supone aproximadamente un 40% más que con la GMr1. Sin embargo la resistencia al corte post-pico es similar para ambos tipos de geomembrana, tal como normalmente ocurre en las interfaces geomembrana rugosa/geotextil.

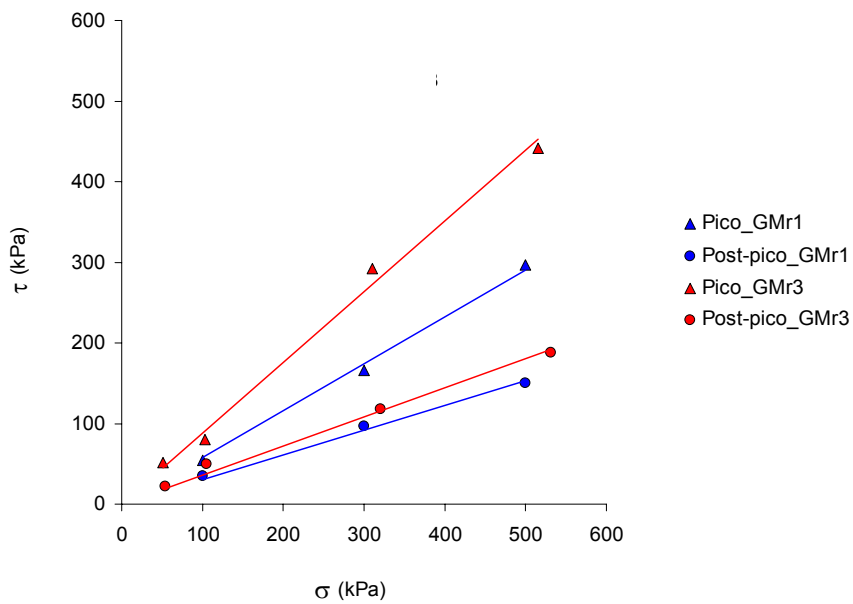


Figura 3.67 Efecto del tipo de rugosidad. Interfaz geomembrana/GCL

3.8 Interfaz geocompuesto drenante/Geosynthetic Clay Liner

Este tipo de interfaz se presenta en el vaso de vertedero. Se ha dispuesto sólo de nueve ensayos de corte directo sobre esta interfaz, realizados básicamente, como comprobación de la metodología de ensayo establecida. Dichos ensayos están indicados en la Tabla 3.11.

El rango de tensiones normales de ensayo se planteó entre 100 y 500 kPa, lo que corresponde a la sollicitaciones comunes en base de vertedero en fase de explotación. La velocidad de ensayo establecida en condiciones secas fue de 5 mm/min, y en condiciones húmedas 0.055 mm/min. El desplazamiento horizontal máximo alcanzado fue de 50 mm.

A continuación, de los resultados obtenidos se extraen algunas conclusiones preliminares sobre el comportamiento resistente observado en dicha interfaz.

Tabla 3.11 Ensayos geocompuesto drenante/GCL

Interfaz	Tipo de ensayo	
	seco	húmedo
GC1(200)**/GCLnw*	3	-
GC3(300)***/GCLnw*	3	3

*GCL ensayada por el lado del geotextil no tejido

**GC1(200) ensayado el lado del geotextil de 200 gr/m²

***GC3(300) ensayado el lado del geotextil de 300 gr/m²

3.8.1 Comportamiento resistente de la interfaz

Al igual que sucedía con la interfaz geomembrana/GCL, las condiciones de humedad en el ensayo repercuten mucho en los mecanismos de interacción del contacto geocompuesto/GCL, y por lo tanto, también en su resistencia al corte. Por ello se analiza el comportamiento resistente de la interfaz diferenciando entre condiciones secas y húmedas.

Ensayo realizado en condiciones secas

Como se muestra en la Figura 3.68, las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal de la interfaz GC3/GCL, presentan una meseta de pico de longitud entre 10 y 20 mm, y posteriormente desciende debido a que las fibras de los geotextiles que están en contacto se estiran, separan y orientan paralelamente a la dirección de corte, daños que se intensifican con el incremento de la tensión normal. Por tanto la sensibilidad también aumenta con la tensión normal y varía entre 1 y 1.5, Figura 3.69. El plano de corte se produce entre la GCL y el geocompuesto para todo el rango de tensiones ensayado, según se ha comprobado observando las muestras con posterioridad al ensayo.

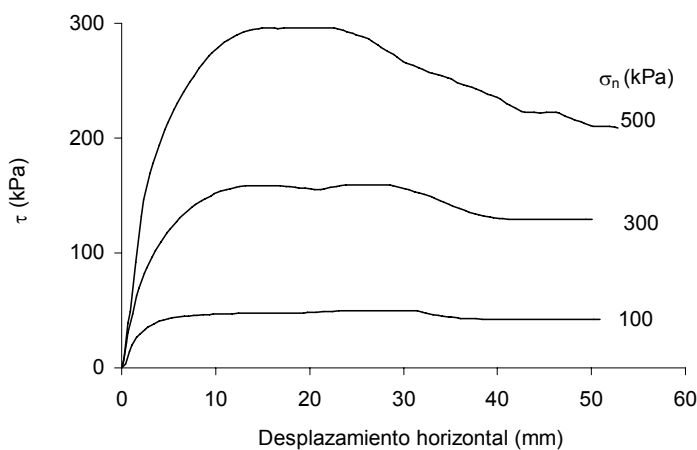


Figura 3.68 Comportamiento de la interfaz geocompuesto(GC3)/GCL en condiciones secas

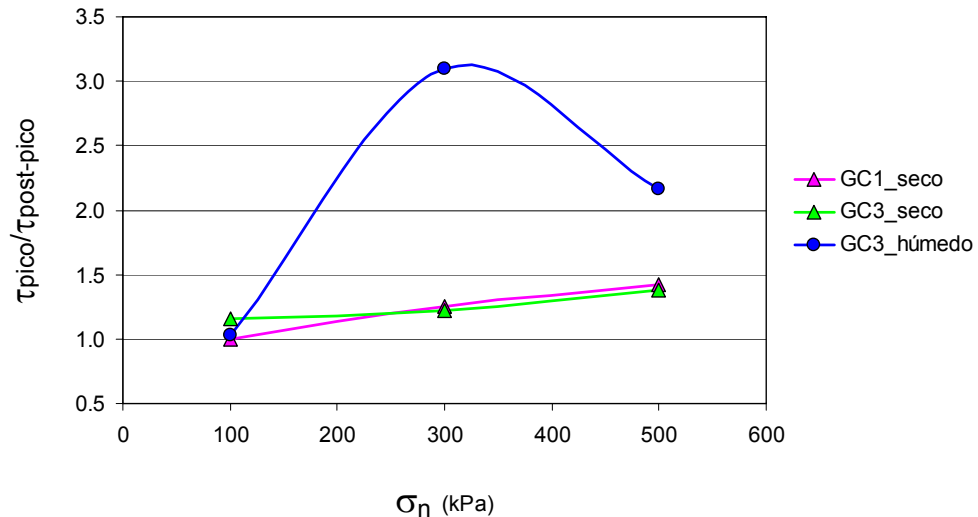


Figura 3.69 Sensibilidad de la interfaz geocompuesto/GCL

Ensayo realizado en condiciones húmedas

La Figura 3.70 muestra las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal obtenidas del ensayo de corte en condiciones húmedas de la interfaz anterior. Al igual que sucedía en el caso de la interfaz geomembrana/GCL, se observa que los mecanismos de rotura del contacto dependen de la tensión normal aplicada:

- Para la tensión normal de 100 kPa la curva asciende al valor de pico a los 7 mm de desplazamiento horizontal, y se mantiene constante a lo largo del ensayo. El plano de corte se produce entre la GCL y el geocompuesto, sin que haya rotura interna de la primera. El valor de la tensión tangencial alcanzada es similar al que resulta en situación seca.
- Para tensiones normales mayores a 100 kPa, las curvas ascienden a un valor de pico, entre 7 y 8 mm de desplazamiento horizontal, y descienden hasta alcanzar el valor post-pico, presentando un comportamiento tipo strain-softening o de reblandecimiento. Los valores de la resistencia son inferiores a los que resultaban en condiciones secas. Al igual que sucede en la interfaz geomembrana/GCL, analizada con anterioridad, la resistencia del contacto interno entre bentonita-geotextil tejido es inferior al del contacto geocompuesto-GCL gracias a la imbricación de las varillas de la geored en la GCL, provocada por la tensión normal aplicada. Con lo cual se produce el valor de pico en el momento que se rompen la mayoría de las fibras de refuerzo de la GCL y el valor post-pico corresponde al simple rozamiento entre el geotextil tejido y la

capa de bentonita. Por tanto en estas condiciones la sensibilidad es mayor que en condiciones secas y varía entre 1 y 3, según se ve en la Figura 3.69.

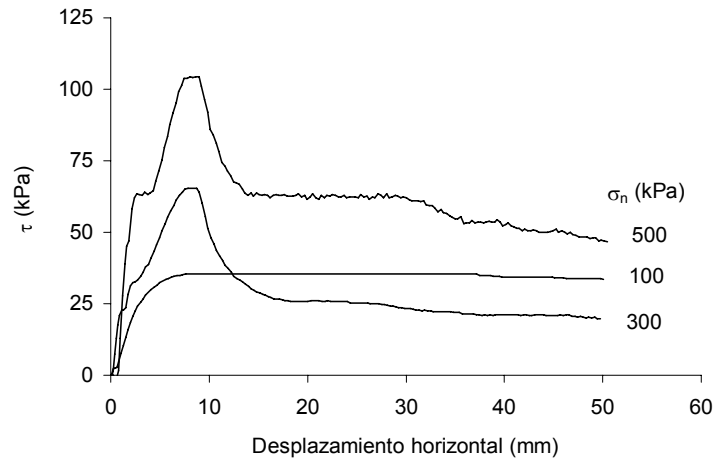


Figura 3.70 Condiciones húmedas. Interfaz geocompuesto(GC3)/GCL

3.8.2 Influencia de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al corte de la interfaz

La Figura 3.71 muestra el efecto de las condiciones de humedad del ensayo en la resistencia al deslizamiento de la interfaz, mediante la representación de las envolventes de rotura de la interfaz GC3/GCL en condiciones secas y húmedas. Obteniéndose en condiciones húmedas resistencias del orden del 60% inferior al ensayo realizado en condiciones secas.

La Figura 3.72 presenta las envolventes de rotura en condiciones secas de la interfaz geocompuesto drenante GC1/GCL ensayados, junto con las que corresponden a la resistencia interna de cada uno de los geosintéticos. Analizando los resultados se observa que en todo momento el plano de corte se produce entre la GCL y el geocompuesto drenante, ya que las envolventes de rotura interna de pico de la GCL y el geocompuesto ensayados son superiores a la de la interfaz. Aunque la resistencia post-pico interna del geocompuesto es inferior a la resistencia post-pico de la interfaz no se alcanza esta situación al no llegar a producirse la rotura interna (situación de pico) del geocompuesto.

La Figura 3.73 muestra las envolventes de rotura interna de la GCL, y de la interfaz GC3/GCL en condiciones húmedas. Observando las envolventes de pico se aprecia que para tensiones normales bajas en el rango ensayado, el plano de corte se produce entre

la GCL y el geocompuesto. Por el contrario, para valores medios y altos de dicha tensión, la rotura se produce en el interior de la GCL, puesto que su resistencia interna al corte es inferior a la de la interfaz.

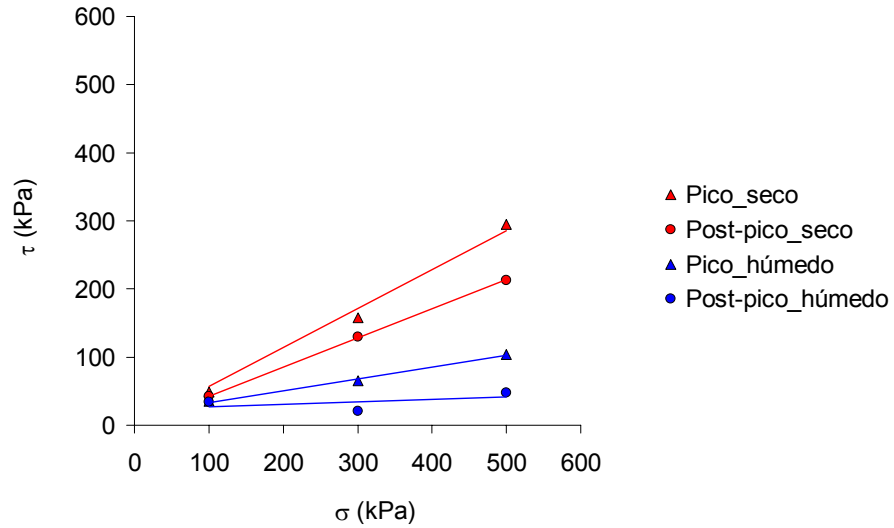


Figura 3.71 Envolventes de rotura. Interfaz geocompuesto (GC3)/GCL

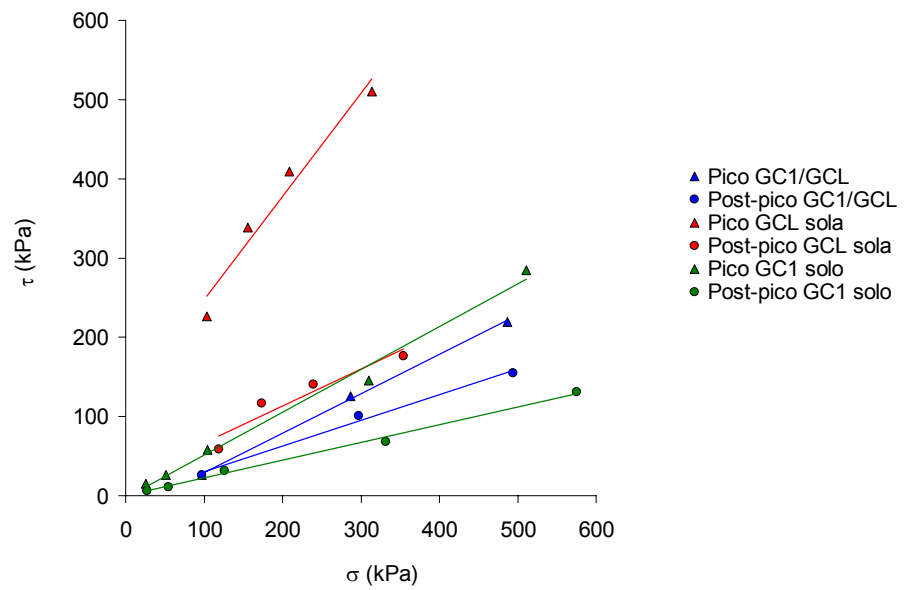


Figura 3.72 Plano de deslizamiento en condiciones secas

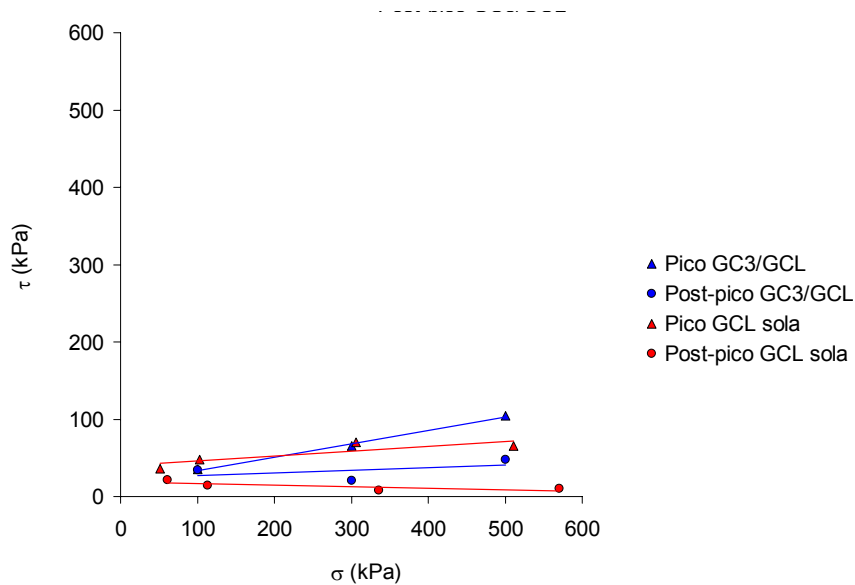


Figura 3.73 Plano de deslizamiento en condiciones húmedas

3.8.3 Influencia del tipo de geocompuesto drenantes en la resistencia al corte de la interfaz

En la Figura 3.74 se muestra las envolventes de rotura en condiciones secas de la interfaz geocompuesto (GC1 y GC3)/GCL, para analizar el efecto del tipo de geocompuesto drenante en la resistencia al corte. Los geocompuestos tienen la masa por unidad de área y el tipo de geotextiles termosoldados a la geored similares. En cambio, la abertura de la geored para el GC1 es de 10x10 mm y su espesor 4 mm. La abertura de la geored de la GC3 es de 15x15 mm y el espesor 6 mm. Las diferencias observadas en su comportamiento deben achacarse a esta circunstancia. Con el geocompuesto cuya geored tiene mayor abertura y espesor se obtienen mayores envolventes de rotura, posiblemente porque la geored tiene mayor rigidez y capacidad de incrustarse en el geosintético contra el que se ensaya. Así pues, la resistencia que se obtiene con el geocompuesto GC3 supone un 30% más que la que ofrece el GC1.

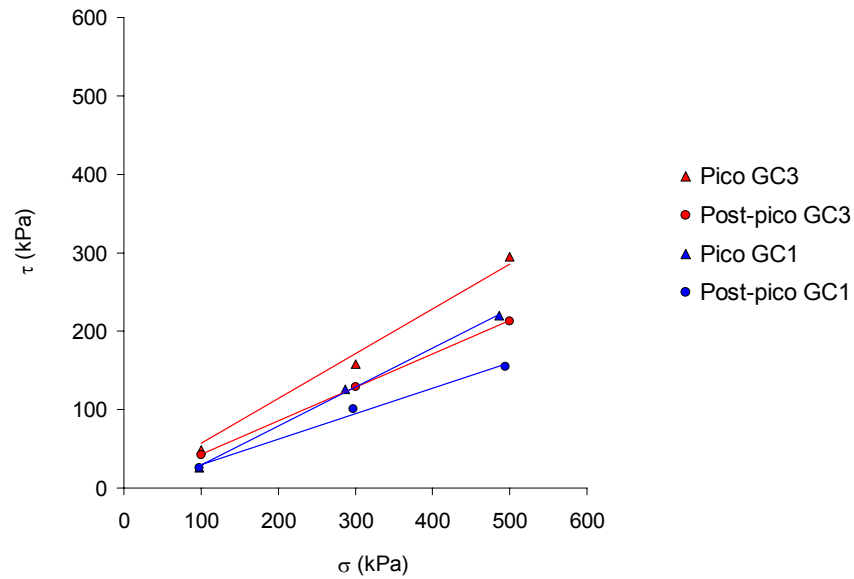


Figura 3.74 Efecto del tipo de geocompuesto drenante. Interfaz geocompuesto/GCL

3.9 Geosynthetic Clay Liner

Para conocer el comportamiento resistente interno de la GCL ensayada, se realizaron un total de 12 ensayos en condiciones secas y húmedas, según la Tabla 3.12. El rango de tensiones normales utilizado en los ensayos fue de 25 a 500 kPa. La velocidad de ensayo en condiciones secas y húmedas fue de 5 mm/min y 0.055 mm/min respectivamente.

Tabla 3.12 Ensayos GCL sola

Geosintético	Tipo de ensayo	
	seco	húmedo
GCL	8	4

3.9.1 Comportamiento resistente al corte de la GCL

Al igual que en las interfaces donde interviene la GCL, las condiciones de humedad en el ensayo tienen gran influencia en la resistencia al corte de la interfaz. Por ello se analiza el comportamiento resistente de la interfaz diferenciando entre condiciones secas y húmedas.

Ensayo realizado en condiciones secas

La Figura 3.75 muestra la tensión tangencial frente al desplazamiento horizontal obtenido de los ensayos en condiciones secas. Las curvas presentan un pico en el momento que se rompen la mayoría de las fibras de refuerzo de la GCL, entre 11 y 15 mm de desplazamiento horizontal, una vez rotas las fibras de refuerzo la tensión se reduce hasta un valor asintótico que corresponde a la resistencia del contacto entre el geotextil tejido y la capa de bentonita adherida al geotextil no tejido. La observación de las muestras una vez ensayadas, indica que la mayoría de las fibras se estiran y se rompen desde el geotextil tejido tal como se muestra en la Figura 3.76.

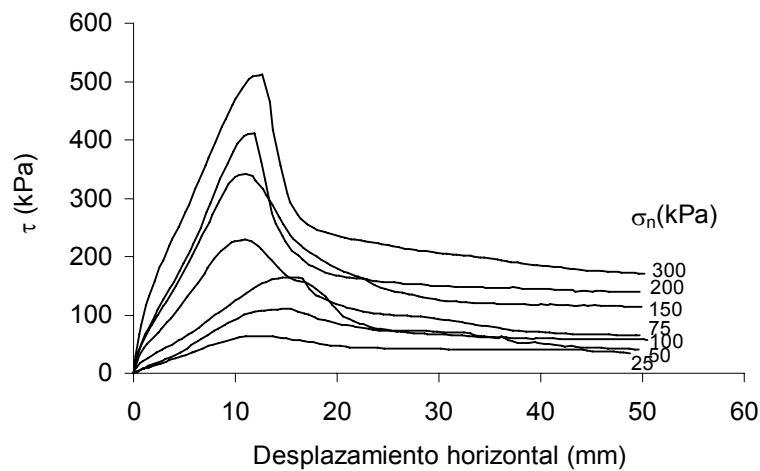


Figura 3.75 Comportamiento resistente de la GCL en condiciones secas

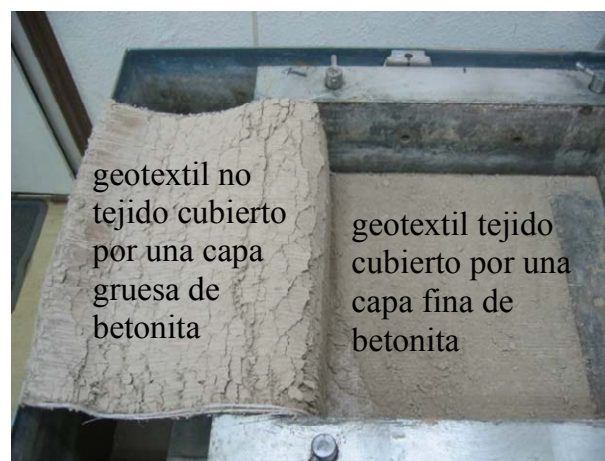


Figura 3.76 Muestra de GCL después de ser ensayada en condiciones secas

Ensayo realizado en condiciones húmedas

En la Figura 3.77 se presenta las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal resultante de los ensayos realizados. Las curvas ascienden hasta un valor de pico, entre 6 y 8 mm de desplazamiento horizontal, momento en que la mayoría de las fibras de refuerzo se rompen, reduciéndose rápidamente la tensión tangencial hasta un valor post-pico representativo del rozamiento entre el geotextil tejido y la capa de bentonita que permanece pegada al geotextil no tejido, Figura 3.78.

La forma de las curvas es similar a las obtenidas en condición seca, pero los resultados en cuanto a valores de resistencia son bastantes inferiores.

En la Figura 3.79 se presentan las envolventes de rotura de las anteriores curvas. Se observa que las condiciones húmedas suponen una reducción de la resistencia de aproximadamente el 90%. El valor de la adhesión para condiciones secas y húmedas es de 41 y 44 kPa respectivamente, valores similares como cabe esperar, ya que en este caso la adhesión representa la resistencia de la unión de las fibras de refuerzo de la GCL al geotextil tejido.

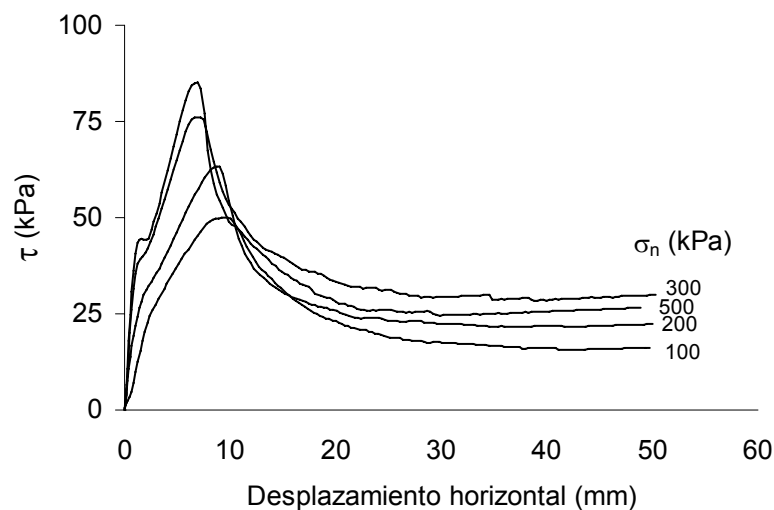


Figura 3.77 Comportamiento resistente de la GCL en condiciones húmedas



Figura 3.78 Muestra de GCL después de ser ensayada en condiciones húmedas

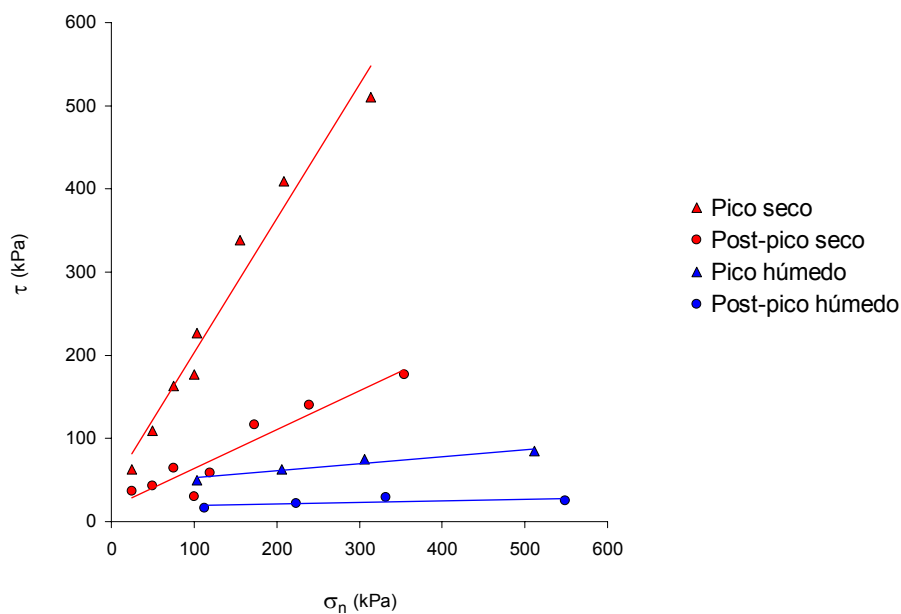


Figura 3.79 Envolventes de rotura de la GCL en condiciones secas y húmedas

3.10 Interfaz suelo/geomalla/geocompuesto drenante

Este tipo de interfaz normalmente se coloca en el sellado de vertedero. Con el objeto de comprobar la metodología de ensayo desarrollada se ejecutaron 7 ensayos, todos ellos en condiciones secas, indicados en la Tabla 3.13. El rango de tensión normal utilizada fue de 25 a 100 kPa para simular las cargas verticales en el sellado. La velocidad de corte fue 5 mm/min y el desplazamiento horizontal máximo alcanzado fue de 50 mm.

Tabla 3.13 Ensayos interfaz suelo/geomalla/geocompuesto

Interfaz	Ensayo seco
Suelo1/geomalla1/GC1(200)*	3
Suelo1/geomalla2/CC1(200)*	4

*GC1(200) ensayado por la cara del geotextil de 200 gr/m²

Como ya se ha mencionado en el apartado 3.2, la geomalla1 está constituida por barras rígidas y su tamaño de abertura de malla es de 71x28 mm, mientras que la geomalla2 está formada por filamentos flexibles y tamaño de abertura de malla 20x20 mm.

De los resultados obtenidos, a continuación se establecen algunas consideraciones sobre el comportamiento resistente observado.

3.10.1 Comportamiento resistente al corte de la interfaz

En la Figura 3.80 se muestran las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal de la interfaz suelo1/geomalla/geocompuesto drenante. Las curvas discontinuas pertenecen a los ensayos realizados con la geomalla1 y las continuas responden a la geomalla2. El comportamiento mecánico a cortante en ambos casos es similar, las curvas ascienden hasta un valor de pico que se mantiene aproximadamente constante, o desciende ligeramente, a lo largo del ensayo.

La resistencia a corte que presenta la interfaz correspondiente a la geomalla1 es superior a la de la geomalla2 para valores bajos de la tensión normal, dentro del rango ensayado. Sin embargo, para el máximo valor de tensión normal aplicada, se obtiene un resultado distinto, correspondiendo la máxima resistencia a la interfaz que contiene la geomalla2. Se analiza este hecho más adelante.

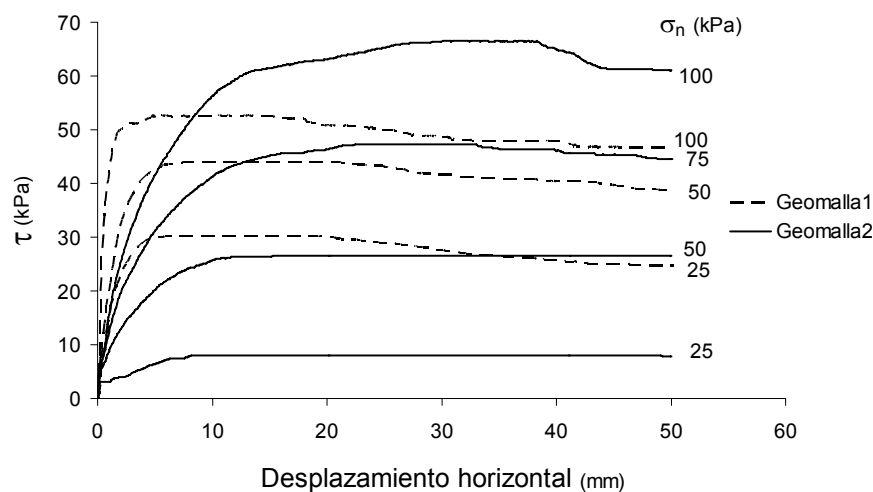


Figura 3.80 Comportamiento de la interfaz suelo/geomalla/geocompuesto drenante

En la Figura 3.81 se presentan fotografías de los dos tipos de interfaz, anteriormente mencionadas, después de ser ensayadas.

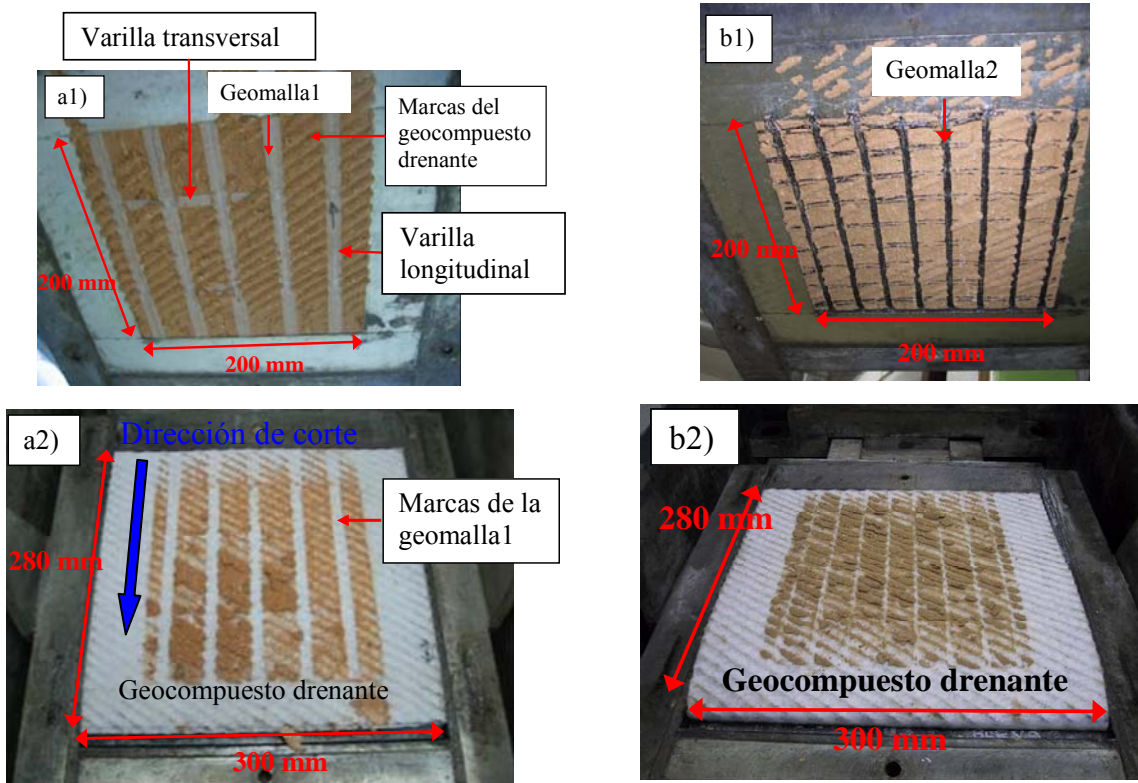


Figura 3.81 Muestras del ensayo suelo/geomalla/geocompuesto después de ser ensayadas: a) geomalla1, b)geomalla2

Analizando dichas muestras, en general, se pueden establecer los siguientes mecanismos de interacción en el proceso de corte:

- Interacción suelo-geocompuesto. El suelo que se encuentra entre las aberturas de la geomalla entra en contacto con la superficie del geotextil que conforma la capa externa del geocompuesto. Como dicho geotextil se amolda a la estructura de la geored existente, la existencia de ésta también influye en la interacción suelo-geocompuesto, como se presenta en el esquema de la Figura 3.82. Donde las varillas longitudinales y transversales son las paralelas y perpendiculares a la dirección de corte respectivamente.
- Interacción geomalla-geocompuesto. La geomalla incide directamente sobre el geocompuesto, transmitiendo las tensiones, a través del geotextil, a la geored interna. Si la geomalla es rígida, los contactos tenderán a concentrarse en los puntos salientes de la geored. En el caso de geomalla flexible se acomoda a las

ondulaciones que la geored crea en el geotextil externo, bajo la actuación de una tensión normal (Figura 3.82).

- Resistencia interna del suelo. El suelo pasa a través de las aberturas de la geomalla y se introduce entre las varillas de la geored que está protegida por un geotextil. El geocompuesto en su desplazamiento con respecto al sistema suelo-geomalla provocan la rotura del suelo (Figura 3.82).

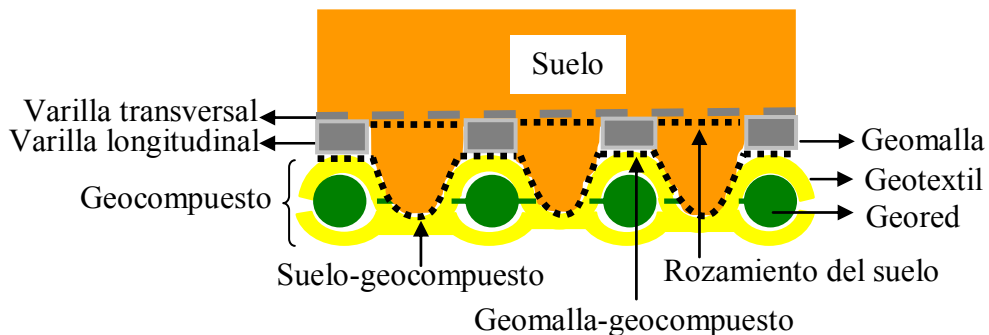


Figura 3.82 Mecanismos de interacción suelo/geomalla/geocompuesto. Sección perpendicular a la dirección de desplazamiento de corte

- Interacción suelo-geomalla. Teóricamente otra forma alternativa de deslizamiento corresponde a un desplazamiento del suelo con respecto a la geomalla, o quedar la geomalla adherida al geocompuesto. Sin embargo de lo observado en las muestras ensayadas se deduce que esta clase de deslizamiento es poco probable.

En la mayoría de los casos, por efecto de la tensión normal aplicada, las tiras de la geomalla se hincan en la superficie del suelo en contacto, restringiendo la posibilidad de movimiento diferencial entre suelo y geomalla. Por otra parte, la resistencia al deslizamiento del contacto geomalla-geocompuesto es inferior a la del suelo-geocompuesto, por lo que facilita, aún más, el movimiento conjunto del suelo y la geomalla, unidos solidariamente entre sí tal como aparece en las fotografías adjuntas.

No obstante, pueden presentarse situaciones en las que la hincas de la geomalla en el suelo sólo se produzca de forma parcial, si la tensión normal aplicada es de bajo valor y la tira es ancha, como es el caso de la geomalla1. Esto puede dar lugar a que se produzcan desplazamientos diferenciales entre suelo y geomalla,

lo que obligará a la masa de suelo a elevarse ligeramente para superar las tiras transversales a la dirección del desplazamiento. Además, pueden aparecer fenómenos de interacción entre el canto de las tiras transversales y el suelo, con movilización parcial de su resistencia pasiva. Todas estas interacciones pueden colaborar conjuntamente en la resistencia al corte (Figura 3.83)

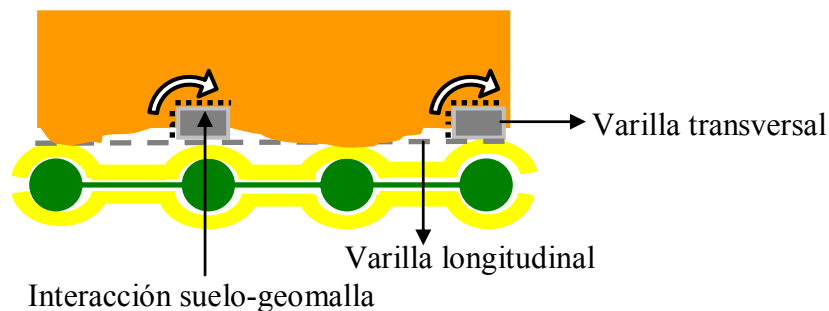


Figura 3.83 Interacción suelo-geomalla. Sección paralela a la dirección de desplazamiento de corte.

3.10.2 Influencia del tipo de geomalla en la resistencia al corte de la interfaz

Para analizar las diferencias resistentes entre las interfaces ensayadas, en la Figura 3.84 se presentan las envolventes de rotura correspondientes a las curvas de la Figura 3.80.

Se observa que la envolvente de la interfaz que corresponde a la geomalla2 es claramente lineal en el rango de tensiones ensayado. Esta característica se ajusta adecuadamente al aspecto observado en la muestras con posterioridad al ensayo, en las que se aprecia, que debido a la introducción de las varillas de la geomalla en el suelo, la resistencia al corte depende, básicamente, de la interacción suelo-geocompuesto y la resistencia interna del suelo, creciendo proporcionalmente a la tensión normal aplicada.

Aunque no hay ensayos para tensiones inferiores a 25 kPa, de la figura parece deducirse un cambio en la interacción para tensiones normales muy bajas. La hincas de la geomalla en el suelo puede llegar a ser sólo parcial y es presumible que aparezcan otros fenómenos de interacción que cambien la pendiente de la envolvente, para que pueda presentar una adhesión nula o ligeramente positiva.

La envolvente de la interfaz correspondiente a la geomalla1 presenta un aspecto contradictorio, obteniéndose mayor resistencia que en la interfaz anterior para tensiones normales menores de 75 kPa, mientras que sucede lo opuesto cuando el valor de la

tensión normal es de 100 kPa. En este último caso, el resultado se adapta bastante bien a la hipótesis de que el mecanismo de interacción que interviene mayoritariamente es el de contacto suelo-geocompuesto y la resistencia interna del propio suelo. El área de huecos, por tanto de contacto suelo-geocompuesto, de la geomalla2 es aproximadamente un 15% superior a la de la geomalla1, lo que se relaciona adecuadamente con el incremento de la resistencia observado.

En el caso de la geomalla1, los resultados obtenidos para tensiones normales menores no parecen ajustarse a estos mecanismos de interacción. Es posible que el mayor ancho de las barras (10 mm), junto con el escaso valor de la tensión aplicada, no permita la hincada total de la varilla en el terreno y se produzca una interacción suelo-geomalla. El hecho observado que puede corroborar esta hipótesis es que ambos ensayos (a 25 y 50 kPa de tensión normal) presentan dilatación positiva de idéntico valor, al contrario que el resto de ensayos de esta interfaz (Figura 3.85), que exhiben comportamiento contractante.

Lo indicado anteriormente debe ser considerado como deducciones iniciales a partir de los resultados obtenidos. Es claro que para llegar a conclusiones fiables exige la ejecución de un mayor número de ensayos que permitan abordar la complejidad de comportamiento de esta interfaz ternaria.

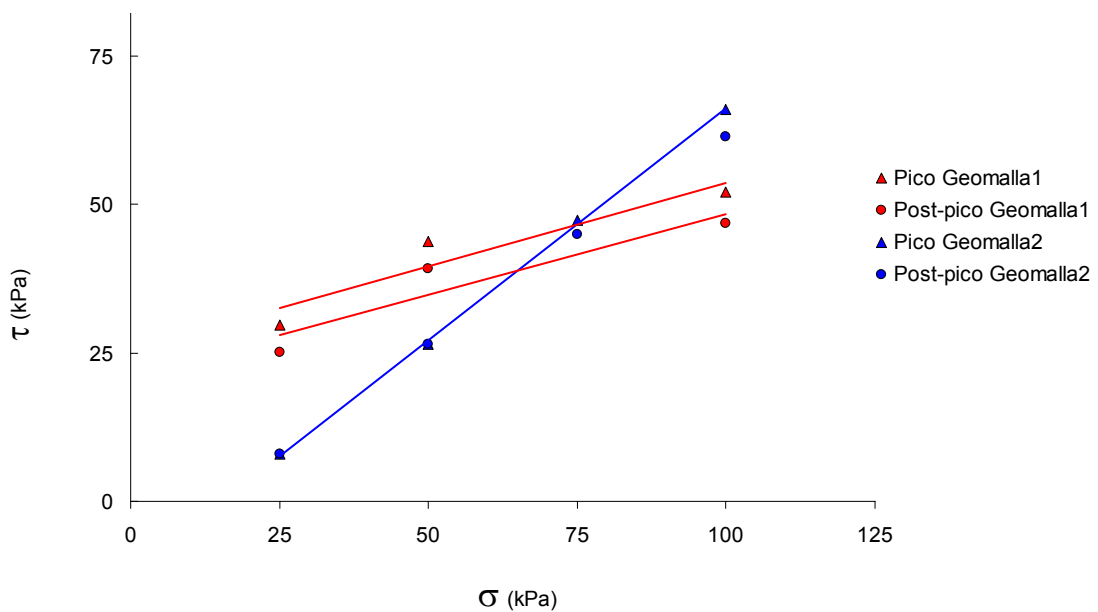


Figura 3.84 Envolventes de rotura interfaz suelo/geomalla/geocompuesto drenante

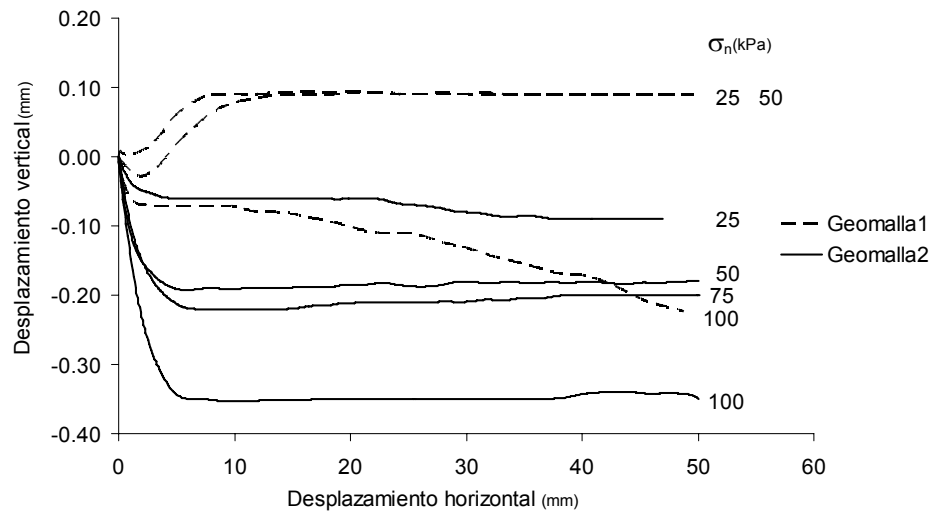


Figura 3.85 Dilatancia interfaz suelo/geomalla/geocompuesto

4 Model and numerical analysis of the direct shear test of geomembrane/geotextile interface

This chapter describes the model and three-dimensional numerical analysis of the mechanical response of the geomembrane/geotextile interface in direct shear. The model was developed to simulate progressive failure of a geomembrane/geotextile interface, and it was used to investigate mechanisms of progressive interface failure and factors that control its significance.

4.1 Shear strength model

4.1.1 Theory

The direct shear model of the interface geomembrane/geotextile arose from the resemblances between the non-planar rock joint and geomembrane/geotextile interface. The surfaces of both contacts have roughness, and show strain-softening response in direct shear test. The next figures show these physical and mechanical similarities. Figure 4.1 (a) represents a non-planar rock joint and (b) textured geomembrane/non-woven needle-punched NWNP geotextile interface.

Figure 4.2 shows the rough surfaces of the rock joints and the geosynthetic materials.

Figure 4.3 presents the shear stress-displacement behavior for non-planar joints and textured geomembrane/non-woven needle-punched geotextile interface.

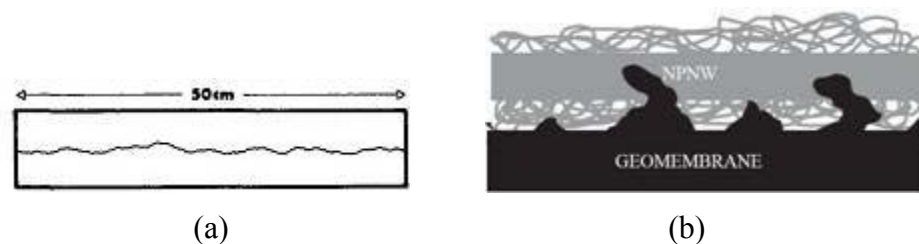


Figure 4.1 (a) Non-planar rock joint (Barton, 1973). (b) NWNP geotextile/textured geomembrane interface (Hebeler et al., 2005)

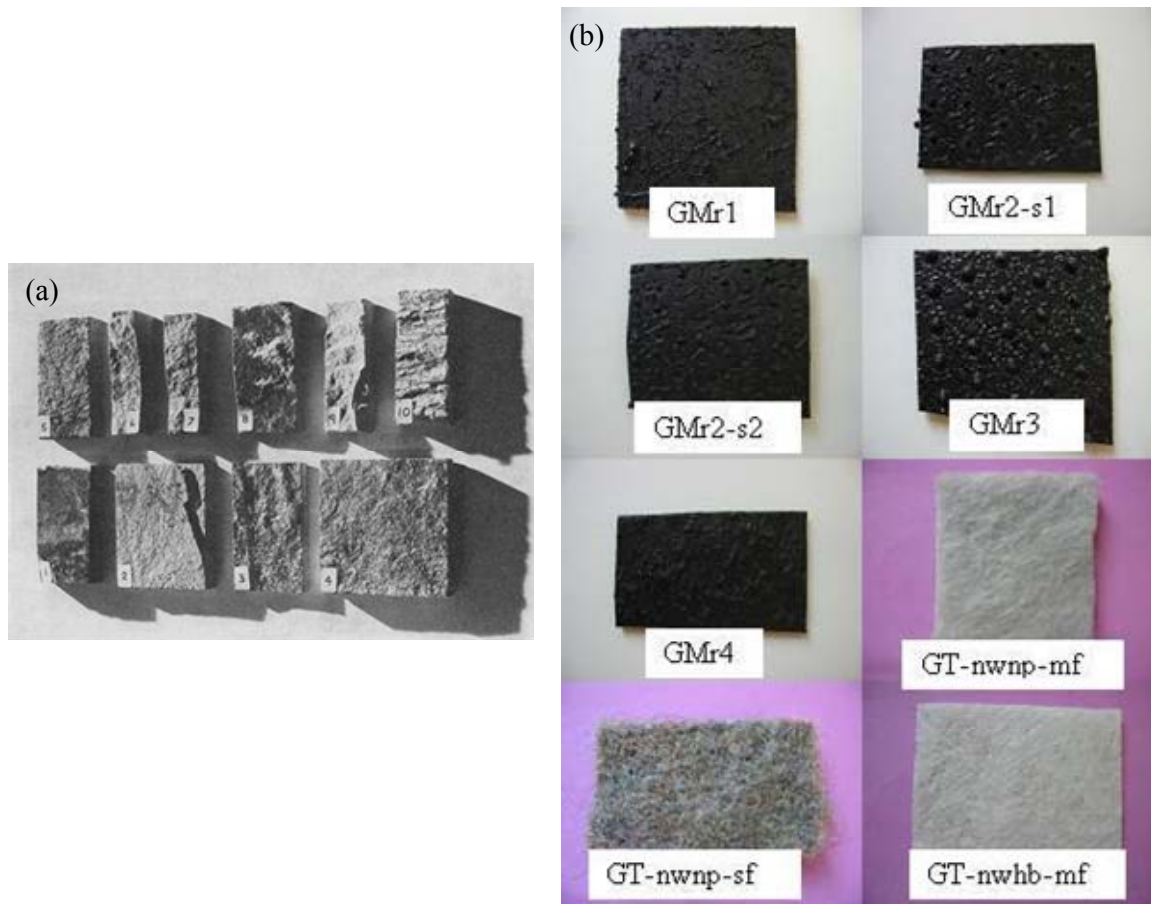


Figure 4.2 (a) Examples of the range of joint roughnesses (Barton and Choubey, 1977). (b) Surfaces roughness of the geosynthetics

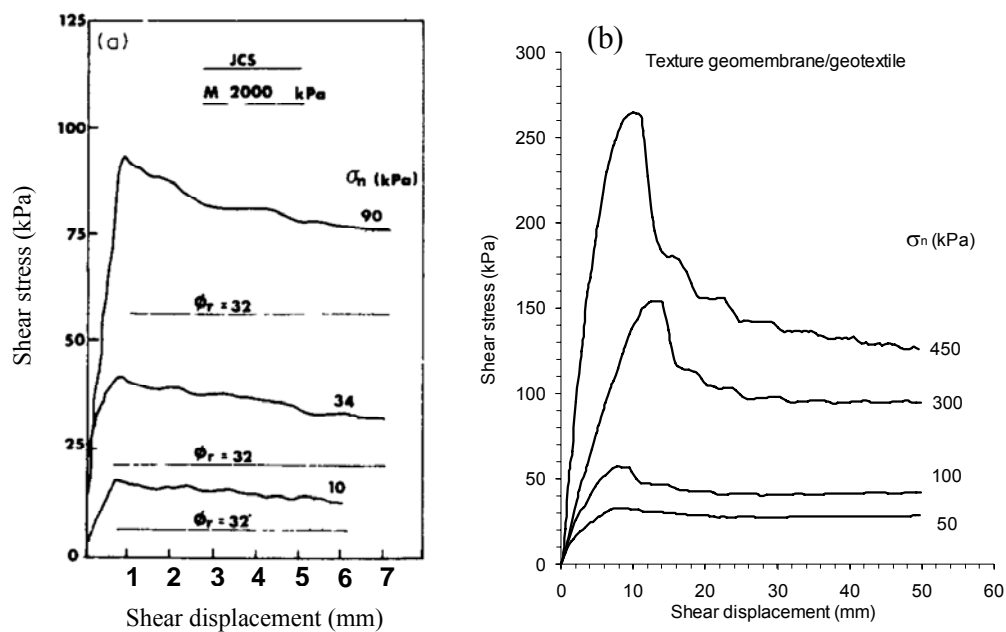


Figure 4.3 (a) Shear stress-displacement data obtained from replicas of rock joints (Barton et al., 1985). (b) Shear stress-displacement data obtained from texture geomembrane/geotextile interface.

In this article, “Review of a new shear-strength criterion for rocks joints”, published in 1973, Nicholas Barton carried out an exhaustive study of shear-strength of rock joints. Based on the ideas developed in this article a shear-strength criterion for geomembrane/geotextile interface was developed. Barton points out the following aspects:

- The strength measured along individual joints by direct shear methods is strongly dependent on the roughness of the joint surfaces.
- It was only considered the rock/rock contact (roughness of unfilled rock-joints).
- The contact area involved when shearing joints is extremely small (real area). The contact area ratio (gross/real) may be closely related to the ratio JCS/σ_n applied in a given test. The JCS value is the joint wall compressive strength (Barton and Choubey, 1976).
- Non-linear peak shear strength envelope for roughness rock joints.
- Recognition that the shear strength of an irregular rock surface can be zero at zero normal stress.
- Shear resistance of rough rock joints is based on the observed dilatant behaviour of granular material such as sand. Newland and Alley (1957) developed an equation of the following type:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (4.1)$$

where

τ maximum shear strength of a granular mass

σ_n effective normal stress

ϕ_b angle of frictional sliding resistance between particles

i average angle of deviation of particle displacements from the direction of the applied shear stress

For the case of rock joint (Barton, 1973):

ϕ_b “basic angle of friction” obtained from “residual shearing test on smooth unweathered rock surfaces

i “effective roughness”, this value is composed by d_n , and s_n . The angular component d_n is the maximum dilation angle which occurs more or less simultaneously with peak shear resistance. The failure component represents failure of intact material (asperities), increases with

s_n

increasing normal stress, while the peak dilation angle does just the opposite.

Finally Barton (1973), using the results of direct shear tests on a wide variety of rock joint roughnesses, related d_n with $\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)$, and d_n with $\frac{\sigma_n}{JCS}$ (see Figure 4.4). He

developed an empirical non-linear equation of peak shear strength which is sensitive both to variable joint roughness (JRC) and to variable joint compressive strength (JCS) for the joint walls. It is written as follows:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (4.2)$$

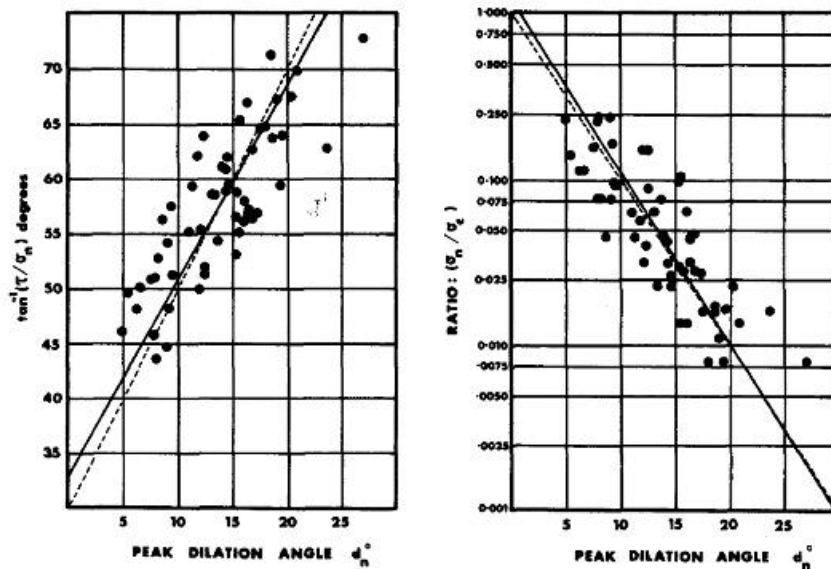


Figure 4.4 Two methods for presenting the results of direct shear test on rock joints. (Barton, 1973)

The joint roughness coefficient (JRC) represents a sliding scale of roughness which varies from the roughest to the smoothest end of spectrum.

This way the shear stress of rough geomembrane/geotextile interface model has been developed following the researches of Barton (1973), Barton and Choubey (1977), Bandis et al. (1983), Barton et al. (1985), Stark et al. (1996), and Hebler et al. (2005).

This model considers the next aspects:

- The strength measured along geomembrane/geotextile interface by direct shear methods is strongly dependent on the roughness of the geomembrane.

- Only considered textures geomembrane/non woven geotextile interfaces, were considered.
- The contact area involved when shearing rough geomembrane/geotextile depends on the normal stress. At low normal stress, the interaction between the needle punched geotextile and the textured geomembranes consists mostly of individual filaments being engaged by the outward region of the geomembrane texture, as seen in Figure 4.5(a). At high normal stress, the geotextile becomes compressed and increasingly interbedded between the features of the contacting geomembrane resulting in matrix level frictional and hook and loop interactions as seen in Figure 4.5(b) (Hebeler et al., 2005).

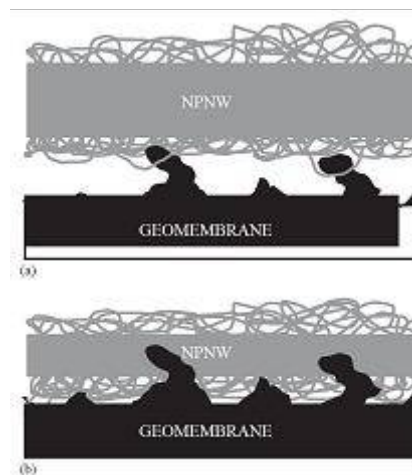


Figure 4.5 Sketch of interaction mechanisms between needle-punched non-woven geotextiles and textured geomembranes at different normal stresses: (a) low normal stress and (b) high normal stress. (Hebeler et al., 2005)

- The transition from the mechanism superficial hook and loop interaction at low normal stress to the matrix level interactions at higher normal stress, depends on the ratio GCS/σ_n which controls the amount of interbedding, asperity and fibers damage for a given geomembrane roughness and geotextile. The GCS is a reference value for the compressive stress on the geotextile, that means the normal stress that achieves an approximated normal deformation of 0.8 of the geotextile. This value is obtained from the curve that represents normal stress versus vertical deformation of the geotextile.
- Giroud and Darrase (1993) considered a curve relationship between shear stress and normal stress which accounts for the non-linear behaviour observed in

laboratory tests data. This fact has been shown in researches carried out by Giroud et al. (1990), Stark et al. (1996), Russell et al. (1998), and Izgin and Wasti (1998).

- Recognition that the shear strength of a geomembrane/geotextile interface can be zero at zero normal stress, as Giroud et al. (1990), Koutsourais and Sprague (1991) present in their researches are based on tilt tests.

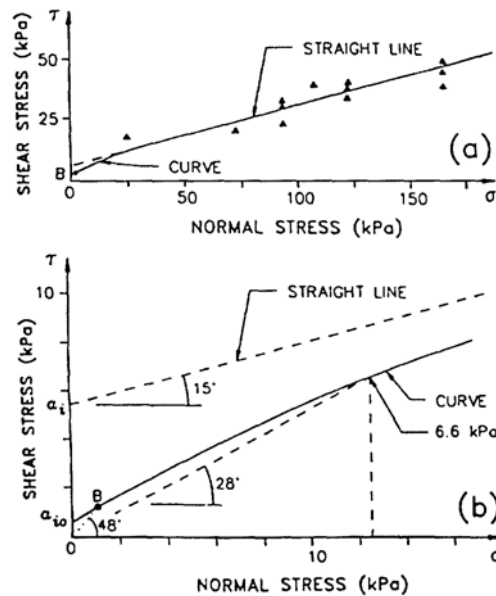


Figure 4.6 Geotextile/rough geomembrane interface shear strength: (a) results of direct shear box tests (▲) and inclined board test, point B (●); and (b) close-up on the vicinity of the origin of the axes. (The curve was conservatively drawn as if it would meet the straight line for $\sigma=50$ kPa) (Giroud et al., 1990)

- The dilation measurement obtained from the large direct shear box is null or very small.
- Shear resistance of rough geomembrane/geotextile interface has been based on the observed shear stress behaviour of rough rock joints. Figure 4.7 shows the results of direct shear tests performed on different textured geomembrane/geotextile interfaces. In the left hand diagram the line through data is the best-fit line obtained by the method of least squares. In the right hand diagram the dotted line points out the trend with negative slope for geomembrane macrotecture bigger than 1 mm and smaller than 1 mm. From these results the following relationships were obtained:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\Delta\phi + \phi_{residual}) \quad (4.3)$$

$$\Delta\phi = R(\sigma_n, roughness, GCS) \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) \quad (4.4)$$

From Eq. 4.3 and Eq. 4.4 by eliminating $\Delta\phi$ is obtained the following empirical relationship is obtained:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan\left[R(\sigma_n, roughness, GCS) \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) + \phi_{residual}\right] \quad (4.5)$$

If the parameter R is equal to $HL \cdot I$ an equation of the following type is obtained:

$$\tau = \sigma_n \tan\left[HL \cdot I \cdot \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r\right] \quad (4.6)$$

where

τ	maximum shear stress (strength) of a textured geomembrane/non-woven geotextile
σ_n	normal stress
HL	hook and loop coefficient
I	interbedding coefficient
GCS	geotextile reference compression stress
ϕ_r	residual friction angle

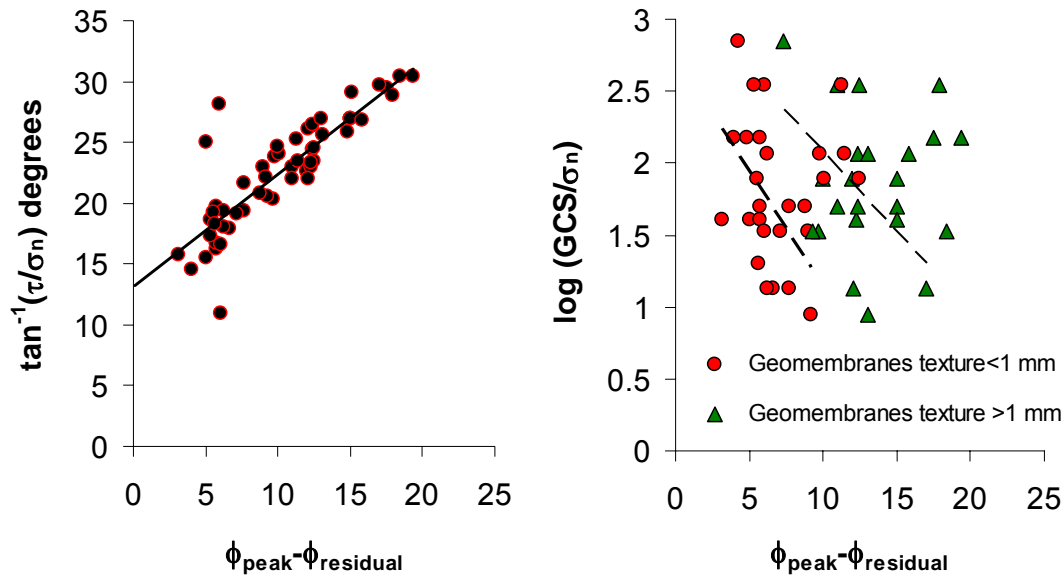


Figure 4.7 Two methods for presenting the results of direct shear tests on geomembrane/geotextile interface

4.1.2 Modelling material

The geosynthetics used in the interface shear testing are described next:

- GT_nwnp_mf: nonwoven needle punched monofilament geotextile.
- GT_nwnp_st: nonwoven needle punched staple filament geotextile.
- GT_nwhb_mf: nonwoven heat bonded monofilament geotextile.
- GMr1: Impingement textured geomembrane.
- GMr2_s1: Structured textured geomembrane side 1
- GMr2_s2: Structured textured geomembrane side 2
- GMr3: Laminated textured geomembrane.
- GMr4: Coextruded textured geomembrane

Table 4.1 and Table 4.2 show the material properties of the geotextiles and geomembranes respectively.

Table 4.1 Summary of geotextiles properties

Geotextile	Composition	Thickness (mm)	Max. tensile strength, md/cmd (kN/m)	Elongation at max. load, md/cmd (%)	Mass (g/m ²)
GT_nwnp_mf	PP	4.23	34/34	90/75	500
GT_nwnp_st	PP	5.02	12/18	90/60	500
GT_nwhb_mf	70% PP 30% PE	2.00	22	33	335

md: machine direction, cmd: cross machine direction.

Table 4.2 Summary of geomembranes properties

Geomembrane	Composition	Thickness (mm)	Tensile stress at yield (MPa)	Elongation at yield (%)
GMr1	HDPE	1.5	17	11
GMr2	HDPE	1.5	16	9
GMr3	HDPE	1.5	15	12
GMr4	HDPE	1.5	16	13

4.1.3 Residual friction angle (ϕ_r)

The research of Stark et al. (1996) show that to mobilize the residual interface shear resistance a displacement 800-1150 mm is required. This displacement is larger than the displacement that can be achieved in large direct shear tests. A shear displacement of between 25 and 60 mm is usually achieved in a 300 x 300 mm direct shear box. If so, direct shear apparatus sometimes may overestimate the residual strength of textured geomembrane/nonwoven geotextile interfaces. Stark et al. concluded that the residual textured geomembrane/nonwoven geotextile interface shear resistance appears to be independent of fiber type, fabric style, and mass per unit area. This research is based on the ring shear test to reach large displacements. Stark and Poeppel (1994), and Russell et al. (1998) investigated the residual shear resistance with ring shear tests too.

The experimental data reported in the literature for textured geomembrane/non-woven geotextile interface suggest that most interfaces have residual angle of friction between 10 and 14 degree. The ϕ_r values listed in Table 4.3 come from Stark and Poeppel (1994), Stark et al. (1996), Russell et al. (1998) researches based on shear ring test, and values from the present investigation based on large direct shear tests.

This way, to develop the shear strength model it was supposed that if the residual friction angle obtained by large direct shear is equal or less than 14 degrees could be accepted. But if it is bigger than 14 degrees then 12 degree will be considered. Except for polyester or HDPE geotextiles that appear to yield higher residual interface shear strength than comparable polypropylene geotextiles. The residual friction angles for shear strength model are shown in Apenndix C, Table 1.4.

Table 4.3 Residual friction angles of texture geomembrane/geotextile interfaces

Geomembrane	Moisture condition	Geotextile (g/m ²) (polymer) (type)			ϕ_r (degree)	Reference
Impingement texture	Dry	750	PP	nwnp	11.7	Russell et al., 1998
Impingement texture	Dry	800	HDPE	nwnp	12.5	Russell et al., 1998
Coextruded textured	Dry	750	PP	nwnp	10.7	Russell et al., 1998
Coextruded textured	Dry	1200	PP	nwnp	9	Russell et al., 1998
Coextruded textured	Dry	800	HDPE	nwnp	17	Russell et al., 1998
Coextruded textured	Dry	540	PP	nwnp	10.8	Stark et al., 1996
Lamination textured	Dry	540	PP	nwnp	10.8	Stark et al., 1996
Lamination textured	Dry	540	PP	nwnp	9.5	Stark et al., 1996
Coextruded textured	Dry	540	PE	nwnp	16	Stark et al., 1996
Coextruded textured	Dry	270	PP	nwnp	11.4	Stark et al., 1996
Impingement texture	Wet	500	PP	nwnp	14	University Cantabria, 2006
Impingement texture	Wet	500	PP	nwnp	12	University Cantabria, 2006
Impingement texture	Dry	500	PP	nwnp	11	University Cantabria, 2006
Structured texture	Wet	500	PP	nwnp	12.5	University Cantabria, 2006
Structured texture	Wet	500	PP	nwnp	12.8	University Cantabria, 2006
Structured texture	Wet	335	70%PP30%PE	nwnp	12.5	University Cantabria, 2006
Structured texture	Dry	500	PP	nwnp	11.4	University Cantabria, 2006
Structured texture	Dry	335	70%PP30%PE	nwnp	10	University Cantabria, 2006
Lamination texture	Wet	500	PP	nwnp	13	University Cantabria, 2006
Lamination texture	Wet	500	PP	nwnp	13	University Cantabria, 2006
Coextruded textured	Wet	500	PP	nwnp	11	University Cantabria, 2006
Coextruded textured	Wet	500	PP	nwnp	13	University Cantabria, 2006
Coextruded textured	Wet	335	70%PP30%PE	nwnp	14	University Cantabria, 2006

nwnp non woven needle punched
 nwpc non woven punched calendered
 nwhb non woven heat bonded

4.1.4 Geotextile reference compression stress (*GCS*)

The geotextile compression stress (*GCS*) is a reference value for the normal stress on the geotextile which achieves an approximated normal deformation of 0.8 of the geotextiles. The measurement of this parameter is of fundamental importance in the interaction mechanisms between geotextiles and textured geomembranes. *GCS* controls the shear strength of the rough geomembrane/geotextile interface controlling the amount of interbedded, asperity and fibers damage. For most geotextiles the compressibility is relatively low. The nonwoven needle punched geotextiles are the most compressible. The *GCS* value is calculated from the relation between normal stress and vertical deformation of the geotextile. This relation is based on standard ISO 9863-1:2005 (procedure B). To measured compressibility and to deduce *GCS* the Uniaxial Test System MTS 20/M, at the Technical University Bergakademie Freiberg, see Figure 4.8, was used. Two load cells, one from 0 to 10 kN with an accuracy of ± 2 N, another one from 0 to 100 kN with an accuracy of ± 20 N. The normal stresses applied were 2, 20, 200, 400, 800, 1600, 3200, 4000, 8000, 10000, 20000, and 35000 kPa. A nominal thickness was assumed when the normal stress on the sample reached 2 kPa. Table 4.4 shows the values of the nominal thickness of the tested geotextiles. Figure 4.9, Figure 4.10 and Figure 4.11 show the results of the compressibility tests carried out for three geotextiles.

Table 4.4 Nominal thickness of the geotextiles

Geotextiles	Nominal thickness (mm)
GT_nwnp_mf	4.23 ± 0.18
GT_nwnp_st	5.02 ± 0.56
GT_nwhb_mf	2.00 ± 0.15

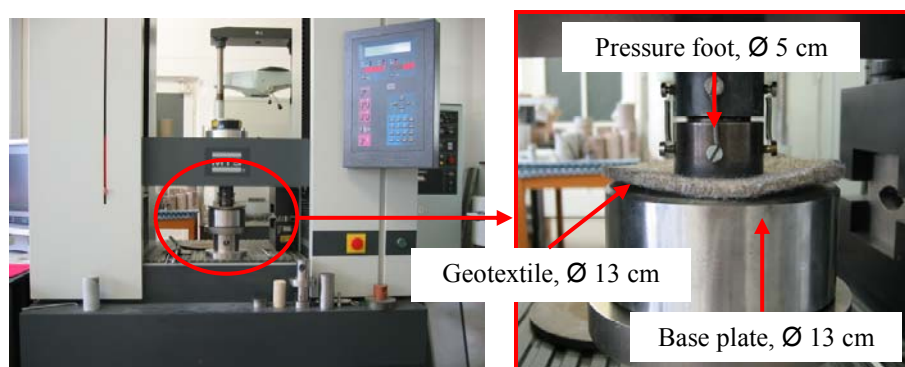


Figure 4.8 Test to obtain the compressibility of the geotextiles

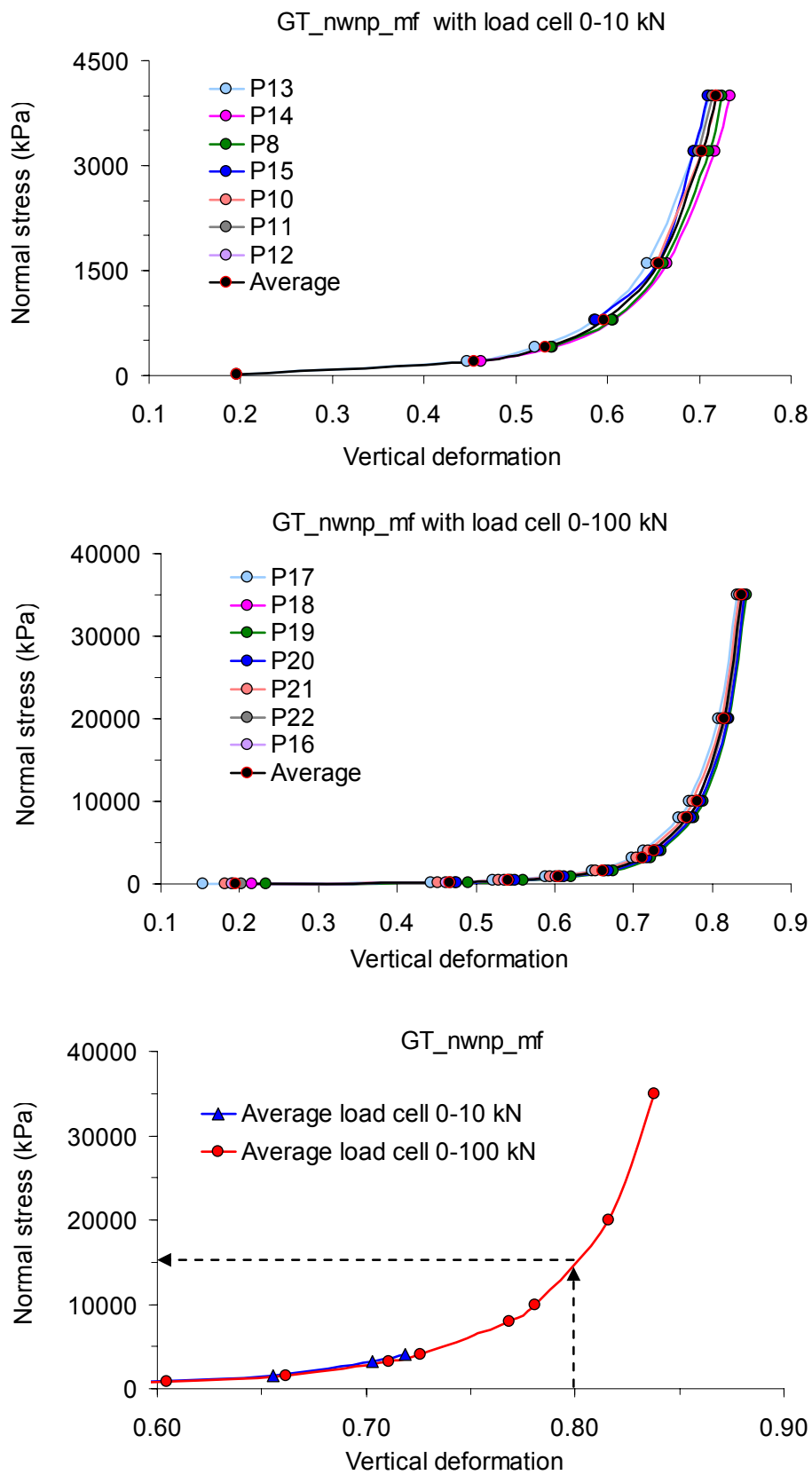


Figure 4.9 Compressibility of GT_nwnp_mf

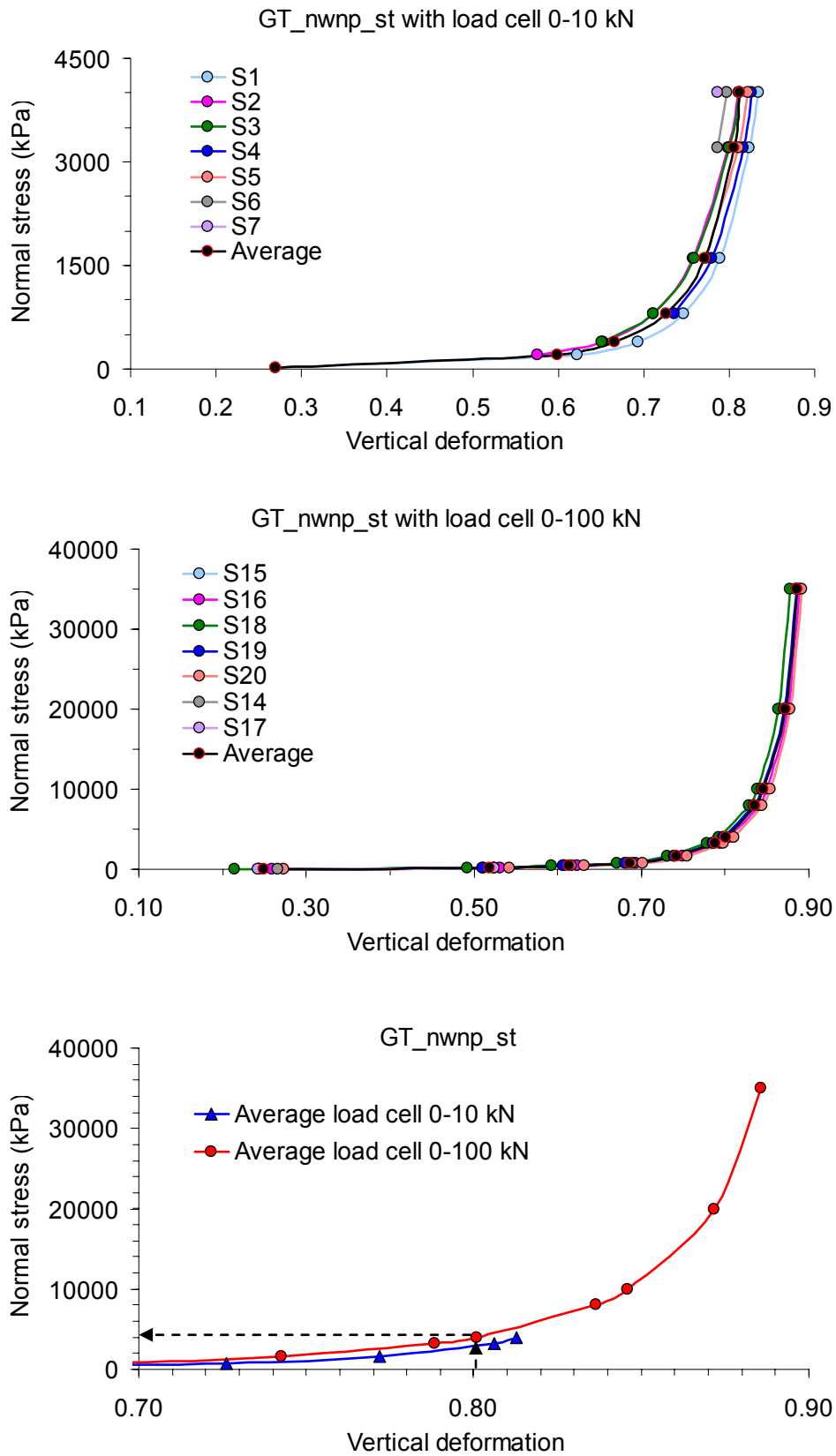


Figure 4.10 Compressibility of GT_nwnp_st

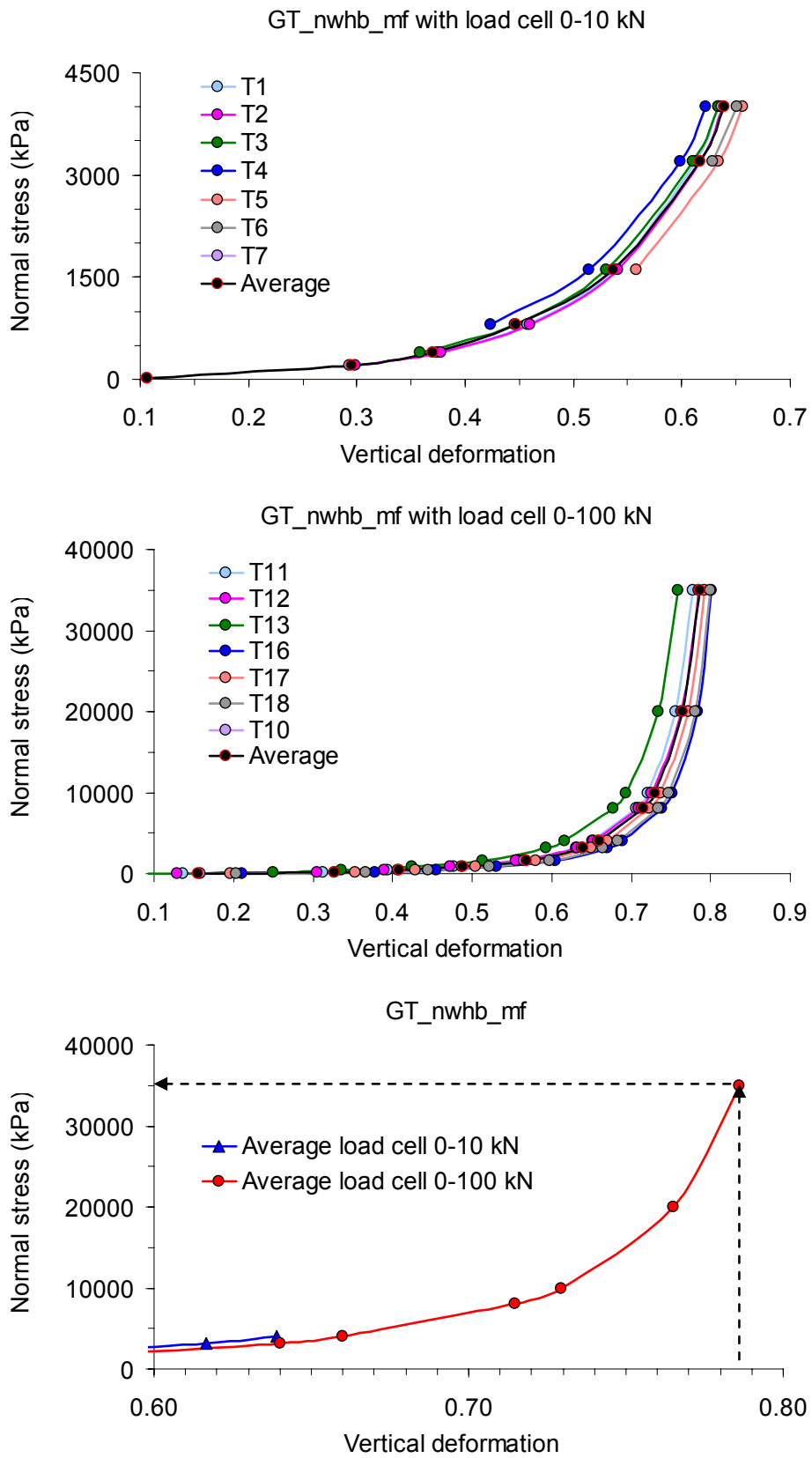


Figure 4.11 Compressibility of GT_nwhb_mf

Table 4.5 shows GCS values considering a vertical deformation of 0.8 as maximum deformation of the geotextiles. If there are not enough data to obtain the curve of compressibility of the geotextile it can be considered $GCS \approx 2 \cdot T_{MD}$, where T_{MD} maximum tensile strength in the machine direction for geotextile. This value is calculated using Table 4.1 and Table 4.4.

Table 4.5 Geotextile reference compression stress

Geotextiles	GCS (kPa)	Thickness (mm)
GT_nwnp_mf	15000	0.85
GT_nwnp_st	4000	1.00
GT_nwhb_mf	35000	0.42

4.1.5 Hook and Loop (HL)

To obtain the value hook and loop, HL , first the R value has to be determined by back-analysing the shear tests that have been performed. Thus, rearranging Eq. 4.5:

$$R = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) - \phi_{residual}}{\log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right)} \quad (4.7)$$

Next R is plotted vs. normal stress for geomembranes texture > 1 mm and geomembranes texture < 1 mm. From these graphs the hook and loop parameter (HL) is obtained for each texture geomembrane/geotextile interface. HL value is the intersection between fit line and x axis. This procedure is shown in Figure 4.13. The HL value depends mainly on the roughness of the geomembrane. As already mentioned Figure 4.7 shows two different trend lines depending on the size of the geomembrane macrotecture. This fact has a great influence on the peak shear strength value and the strain-softening behaviour if the texture geomembrane/geotextile interface undergoes a direct shear. Figure 4.12 shows scans from a Scanning Electron Microscope (SEM), which show the macrotecture of the different geomembranes used in the test program. Appendix C, Table 1.6 shows the hook and loop values.

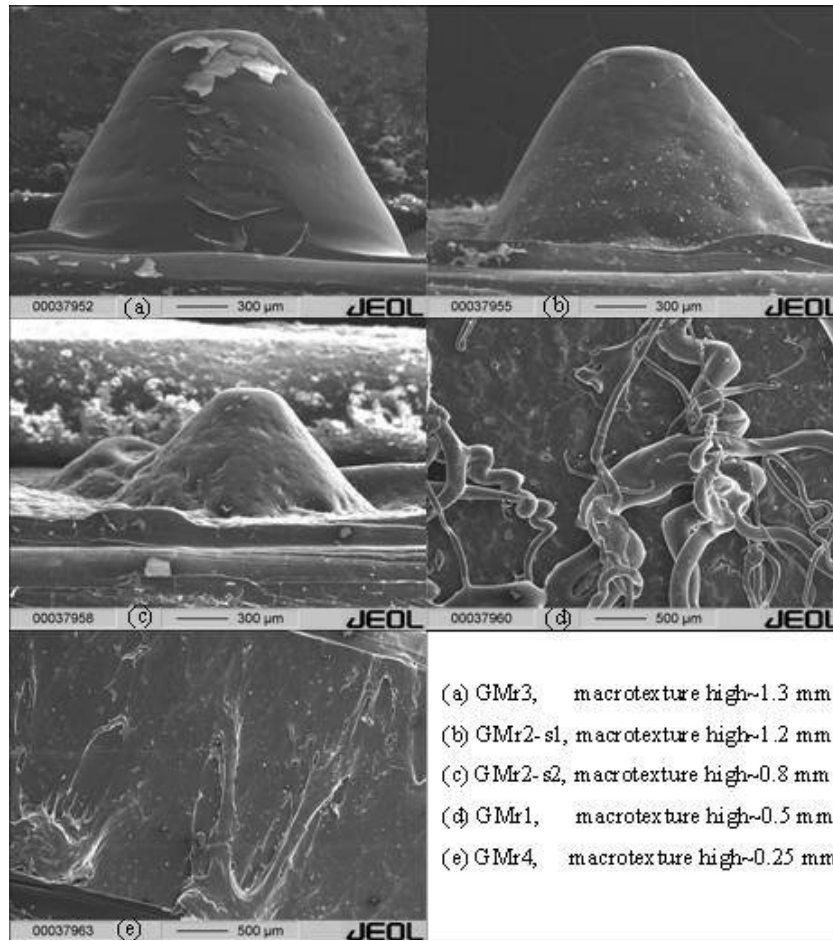


Figure 4.12 Images of texture geomembranes used in the test program.

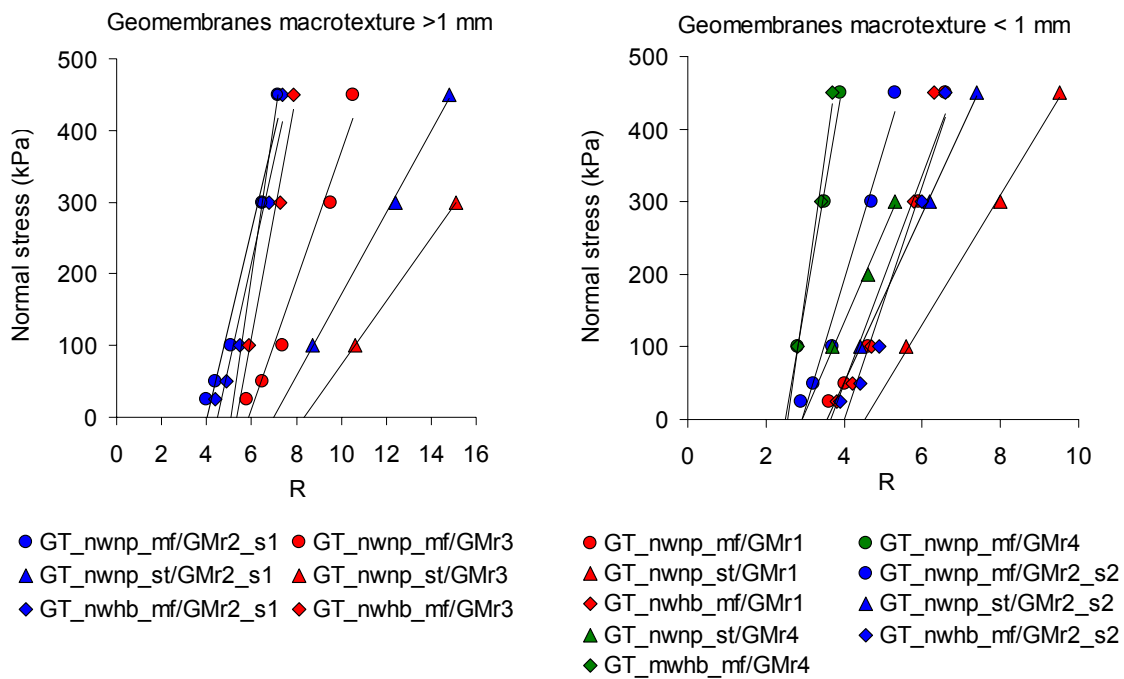


Figure 4.13 R vs. normal stress geomembranes macrotexture >1 mm and < 1mm

4.1.6 Interbedding (I)

The interbedding coefficient characterizes the interlocking between the asperities of the geomembrane and the geotextile. This coefficient increases with increasing normal stress. To obtain the interbedding parameter as a function of normal stress, the interbedding I was plotted vs. $R/\log(GCS/\sigma_n)$. The interbedding value is $\frac{R}{HL}$. Best-fit lines were obtained by the method of least squares using data from each test, see Figure 4.14, Figure 4.15, and Figure 4.16. As $R = HL \cdot I$ the general equation obtained is the following one:

$$I = \frac{N \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right)}{\log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) - M \cdot HL} \tag{4.8}$$

M and N are constants of the fit line.

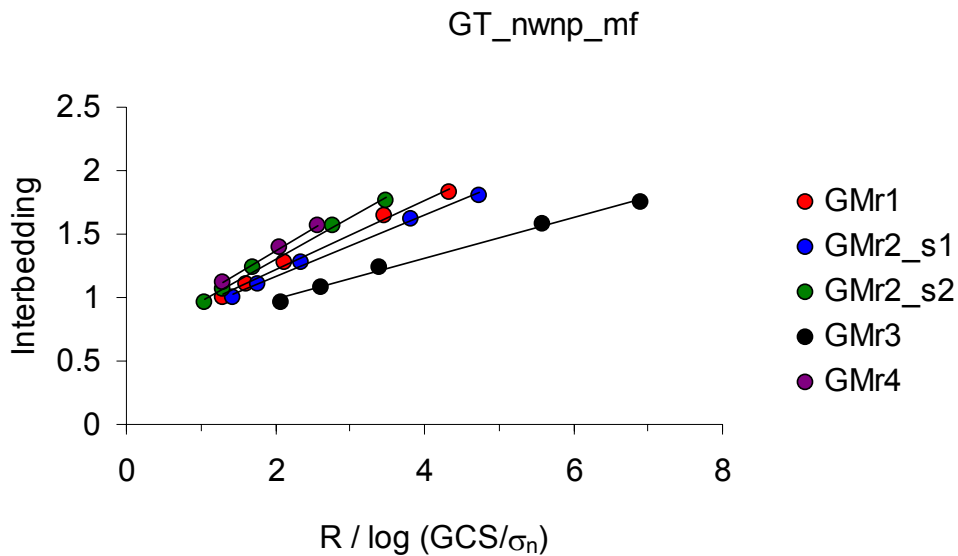


Figure 4.14 Interbedding for the geotextile non-woven needle punched made with monofilaments

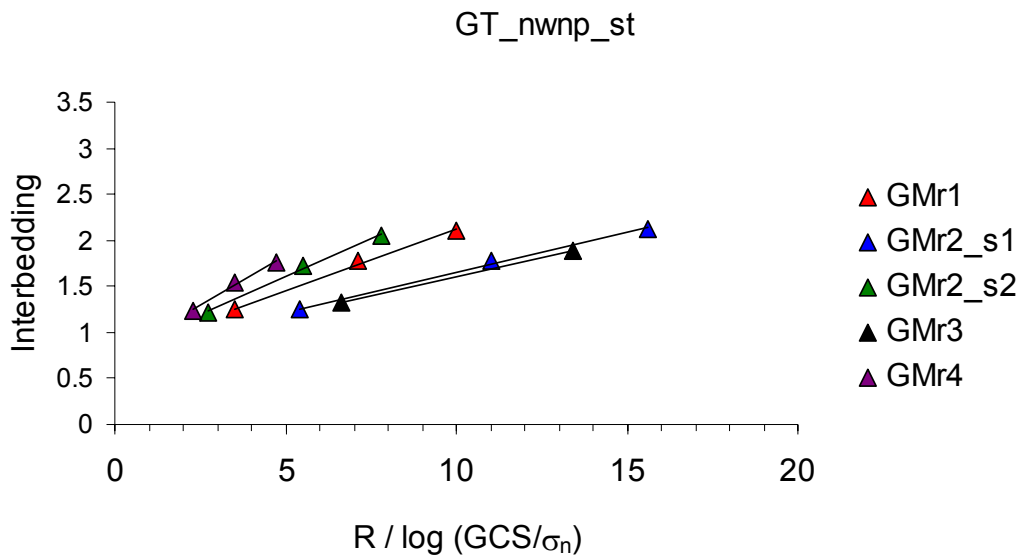


Figure 4.15 Interbedding geotextile non-woven needle punched made staple fibers

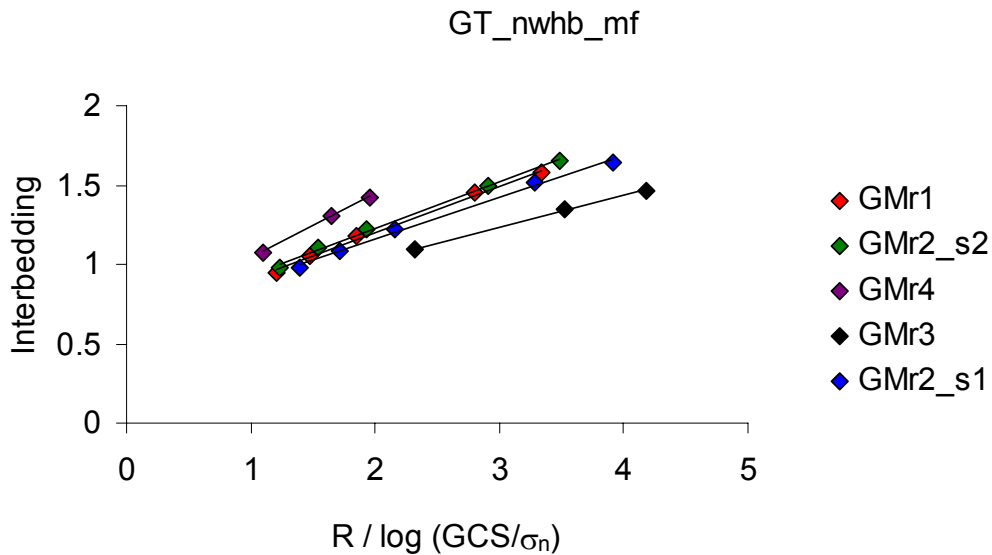


Figure 4.16 Interbedding geotextile non-woven heat bonded made monofilaments

The M , N constants and the correlation coefficient, cc , are shown in Apéndice C, Table 1.7.

If the interbedding parameter in Eq. 4.6 is substituted by the expression (4.8) the next equation is obtained:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\frac{HL \cdot N \cdot \log^2 \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right)}{\log \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right) - M \cdot HL} + \phi_{residual} \right] \tag{4.9}$$

This equation is valid inside the limits imposed by the interbedding parameter as the next figures shows:

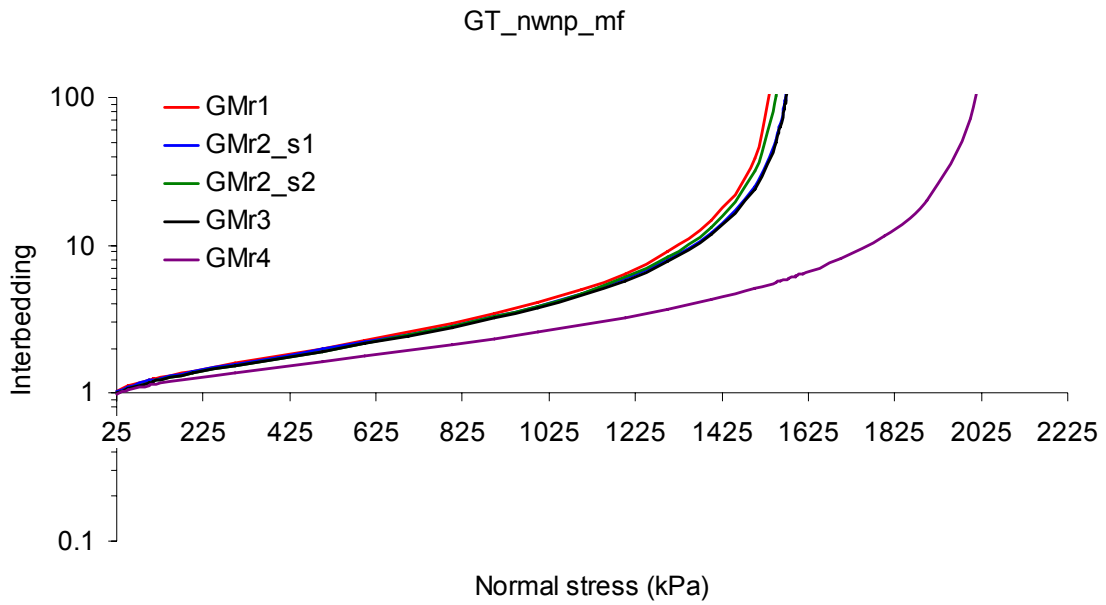


Figure 4.17 Interbedding vs. normal stress for the geotextile non-woven needle punched made with monofilaments

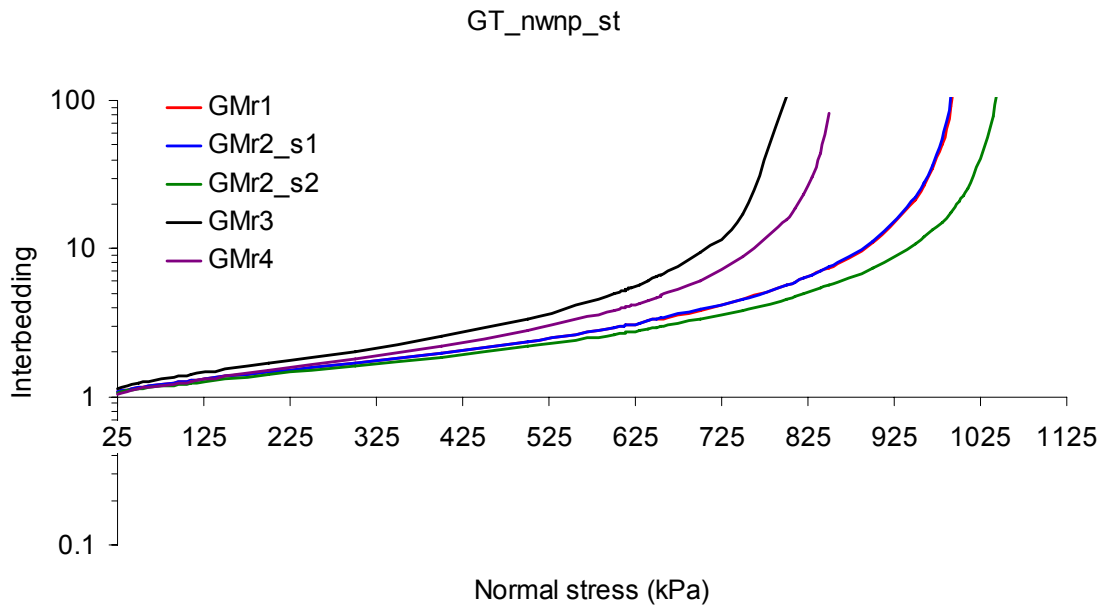


Figure 4.18 Interbedding vs. normal stress for the geotextile non-woven needle punched made with staple fibers

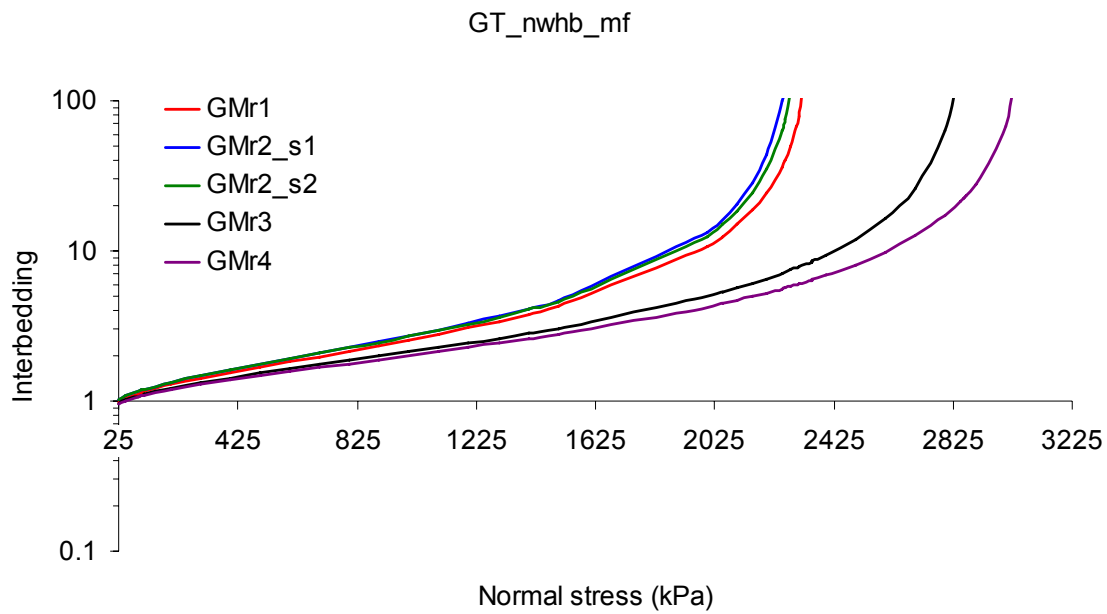


Figure 4.19 Interbedding vs. normal stress for the geotextile non-woven heat bonded made with monofilaments

Figure 4.17, Figure 4.18 and Figure 4.19 show that the formulation depends mainly on the type of geotextile, and the GCS value. Therefore, the limitation of the model is given the following expression:

$$\frac{GCS}{\sigma_n} > 10^{HL \cdot M} \quad (4.10)$$

The range of stress operating in the experiments was $25 \leq \sigma_n \leq 450$ kPa. This way there is uncertainty about the results for $\sigma_n > 450$ kPa..

Figure 4.20 shows that the interbedding factor depends on the type of geotextile. Bigger interbedding corresponds to geotextiles with bigger holes, as shown exemplary for the geotextile made with staple fibers (Figure 4.21). This plot shows the Scanning Electron Microscope (SEM) sight of the fibers of the different geotextiles used in the test program.

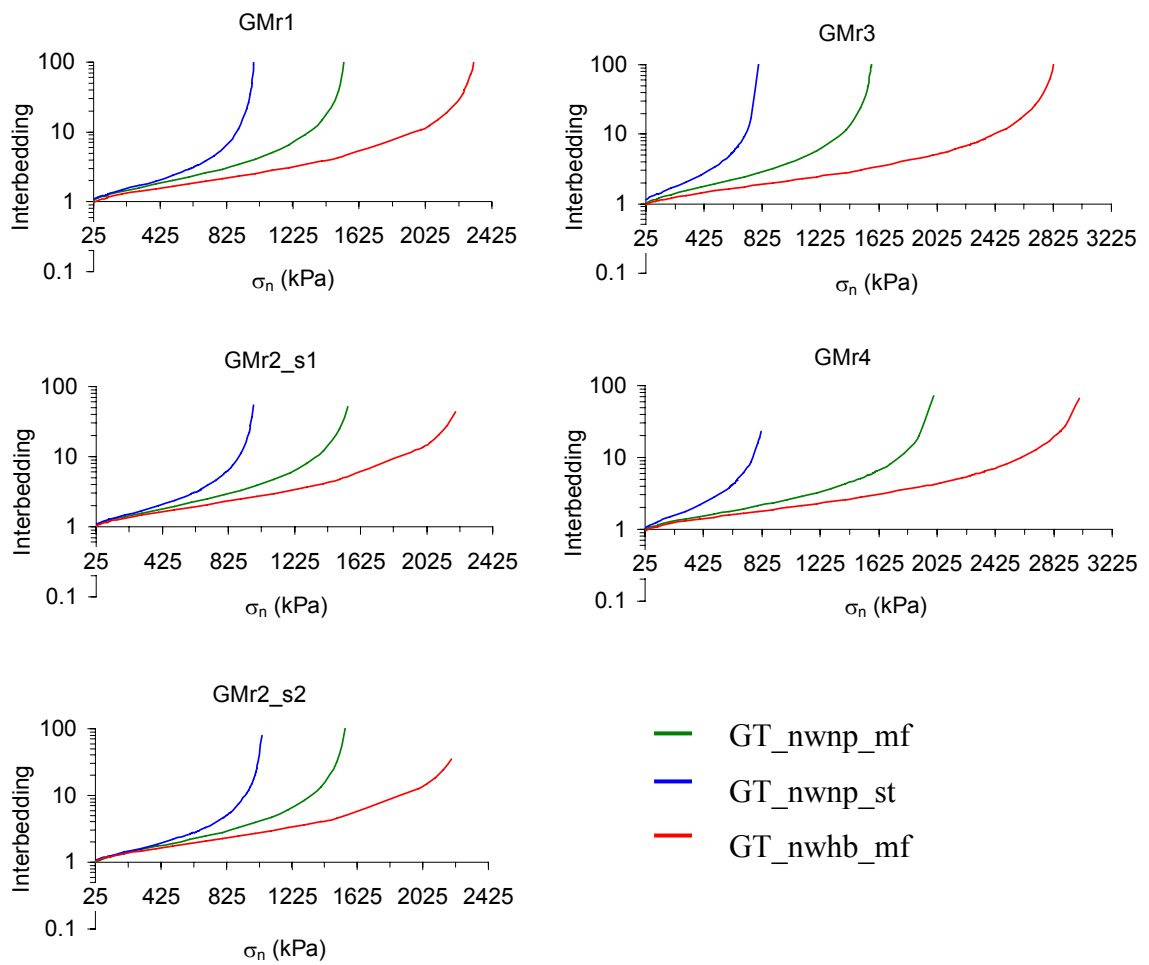


Figure 4.20 Interbedding vs. normal stress

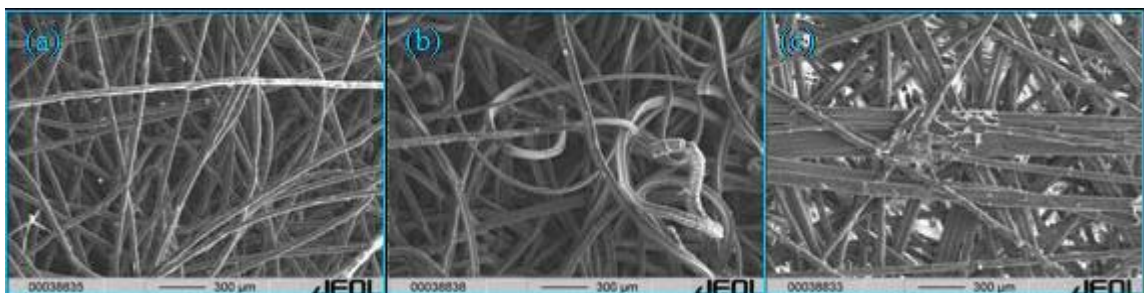


Figure 4.21 Images (SEM) of geotextiles used in the test program.

(a) GT_nwnp_mf

(b) GT_nwnp_st

(c) GT_nwhb_mf

4.1.7 Peak displacement (δ_{peak})

The shear displacement δ_{peak} required to reach peak shear strength is important to determinate the post peak softening trend throughout the tested normal stress range of 50-450 kPa. Usually normal stress less than 50 kPa has limited post-peak strain softening behaviour.

The mean values of δ_{peak} varies between 3.5-10 mm for $50 < \sigma_n \leq 450$ kPa and 1-5 mm for $\sigma_n \leq 50$ kPa. Figure 4.22 represents δ_{peak} vs. σ_n . These graphs show the peak displacements for all tests carried out with different interfaces. Up to now the reason for the variations is not entirely clear. However the geotextiles GT_nwnp_mf and GT_nwhb_mf present similar trends in the variation of the peak displacement with the normal stress, except for the geomembrane GMr2_s2. In this case GT_nwhb_mf and GT_nwnp_st have similar trend. Hebel et al. (2005) explain that the relative contributions of frictional and hook and loop resistance leads to the trends and differences in displacement to peak strength. Therefore, the value R ($R = HL \cdot I$) vs. normal stress was plotted in Figure 4.23, that shows similar trend of GT_nwnp_mf and GT_nwhb_mf except for GMr2_s2. However it is very difficult to get a clear trend of the peak displacement. In this investigation it was observed that the peak displacement increases with the normal stress following a straight line. The fit parameters (a , b) and correlation coefficient (cc) of the best fit lines obtained by the method of least squares are presented in Apenndix C, Table 1.8.

$$\delta_{peak} = a + b\sigma_n \quad (4.11)$$

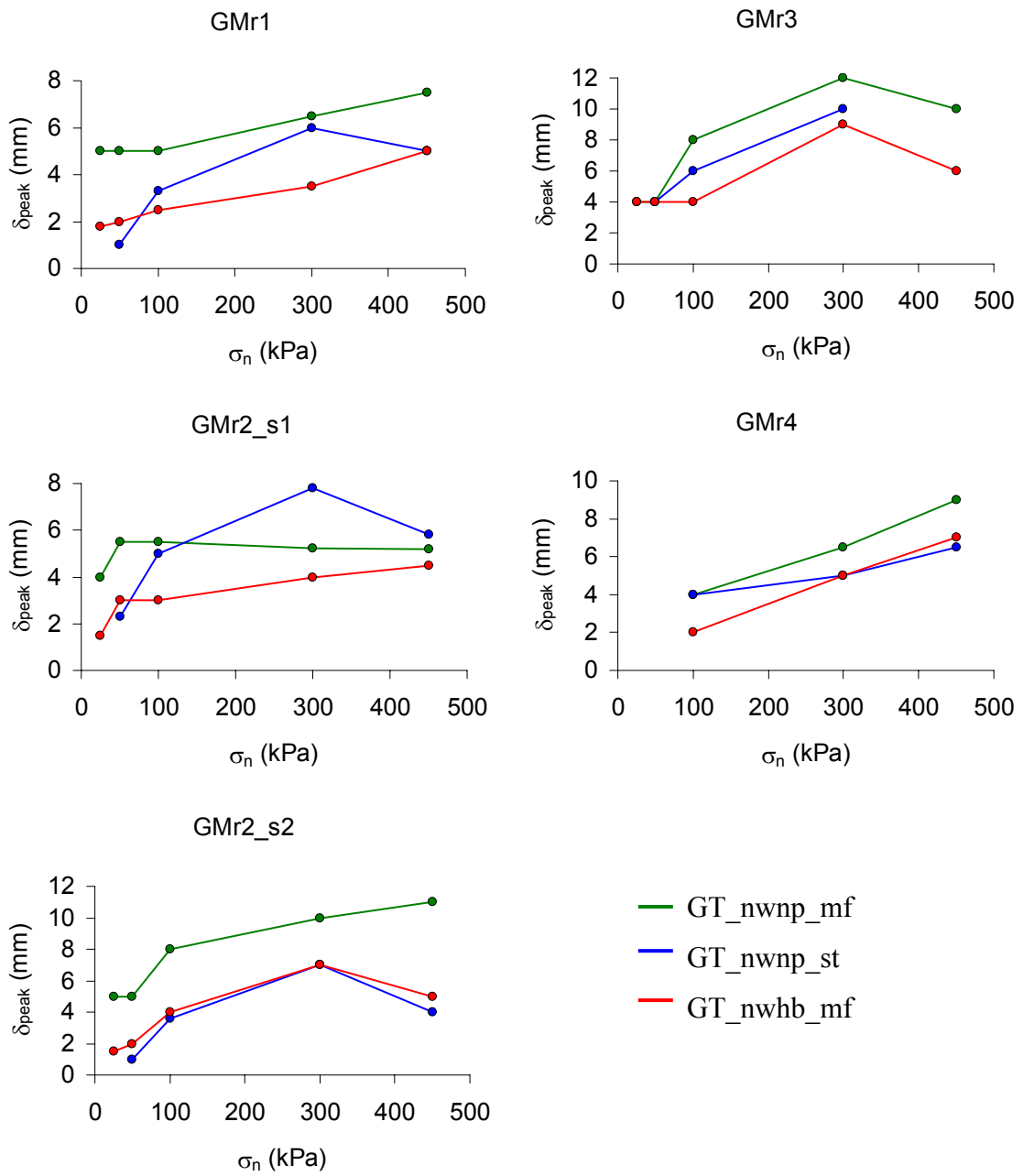


Figure 4.22 Peak displacement vs. normal stress

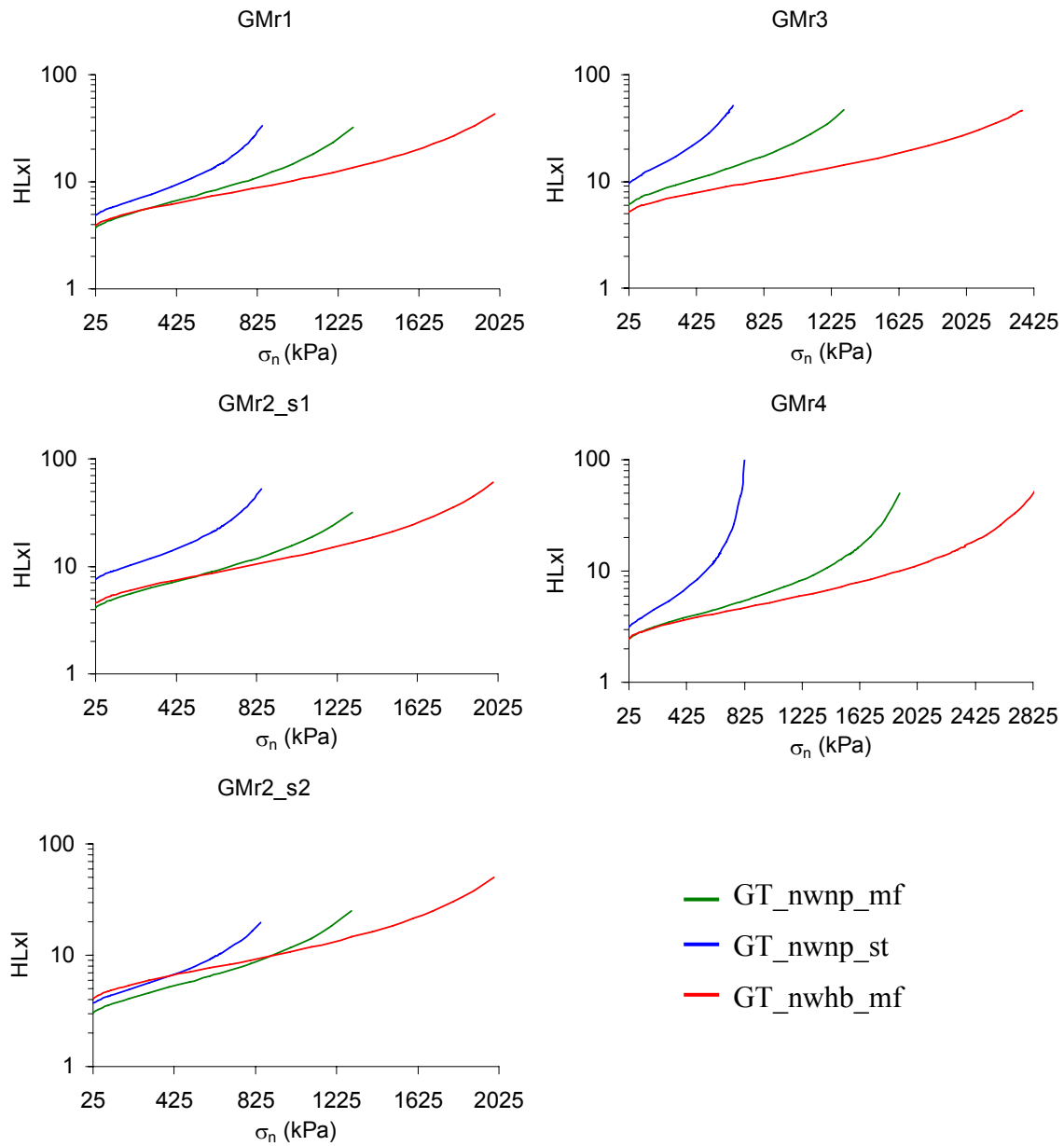


Figure 4.23 $HL \cdot I$ vs. normal stress

4.1.8 Mobilization of hook and loop during shear

Similar to Barton et al. (1985) created a dimensionless model for shear-displacement modelling has been obtained for texture geomembrane/geotextile interface. The $HL \cdot I$ coefficient is specially related to peak shear strength. The corresponding peak friction angle (ϕ_{peak}) can be expressed as follows.

$$\phi_{peak} = HLI \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) + \phi_{residual} \quad (4.12)$$

This peak strength is mobilized following a shear displacement denoted by δ_{peak} . During the peak displacement $\phi_{residual}$ is mobilized first, followed by the hook and loop-interbedding factor. If the displacement is larger than δ_{peak} , the filaments are pulling out and/or tearing from the geotextile causing hook and loop loss. The strength at any given shear displacement (δ) is denoted by ϕ (mobilized), whose value depends on the corresponding magnitude of HL (mobilized)

$$\phi(mob) = HL(mob)I \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right) + \phi_{residual} \quad (4.13)$$

The dimensionless co-ordinates are $HL(mob)/HL(peak)$ and $\delta/\delta(peak)$. This way it is possible use a table of values for these dimensionless terms for each test to predict shear stress-displacement behaviour for texture geomembrane/geotextile having any desired values of HL , I , GCS and $\phi_{residual}$. This can be done for any stress level of interest. The Figure 4.24 shows the dimensionless formulation. The following key aspects of behaviour are modelled in the order in which they occur during a shearing event:

1. Friction is mobilized when shearing begins
2. Hook and loop-interbedding is mobilized (egg. at $\frac{\delta}{\delta_{peak}} = 0.3$)
3. Peak strength is reached at $\frac{HL(mob)}{HL(peak)} = 1.0$, $\frac{\delta}{\delta_{peak}} = 1.0$ (note also differentiation between $\sigma_n \leq 100$ kPa and $\sigma_n > 100$ kPa)
4. Hook and loop loss because of the filaments are pulled out and/or torn from the geotextile, filaments are loose, and degradation of the geomembrane texture ($\delta > \delta_{peak}$)
5. Residual strength is finally reached after a large shear displacement ($\delta = 150\delta_{peak}$, $HL(mob) = 0.0$).

One example of these dimensionless terms is showed in Table 4.6.

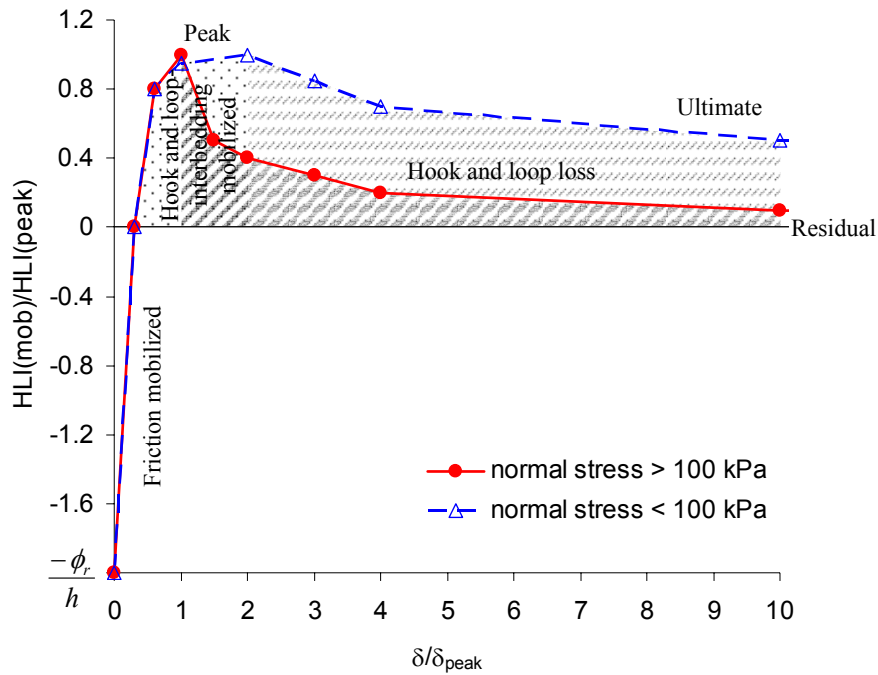


Figure 4.24 Dimensionless model of shear behaviour of texture geomembrane/geotextile

Table 4.6 Dimensionless co-ordinates of the shear stress-displacement model

δ/δ_{peak}	$HL(mob)/HL(peak)$		
	$\sigma_n > 100 \text{ kPa}$	$\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$	
0	$-\Phi_{residual}/h$	$-\Phi_{residual}/h$	Start
0.3	0	0	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> <div style="margin-right: 5px;">↓</div> </div>
0.6	0.8	0.8	
1.0	1.0	0.95	
2.0	0.4	1.0	
3.0	0.3	0.9	
4.0	0.2	0.8	
10.0	0.1	0.7	
150.0	0	0	Ultimate Residual

Equations 4.12 and 4.13 provide the required values of $HL(mob)/HL(peak)$ from initiation, through peak strength and down to residual strength. It is readily shown that

$$\frac{HL_{mob}}{HL_{peak}} = \frac{\phi_m - \phi_{residual}}{\phi_{peak} - \phi_{residual}} \tag{4.14}$$

At start $\frac{HL_{mob}}{HL_{peak}} = -\frac{\phi_{residual}}{h}$, where $h = HLI \log\left(\frac{GCS}{\sigma_n}\right)$

4.1.9 Normal stiffness (kn) and shear stiffness (ks).

The normal and shear stiffness parameters are fundamental input data for numerical approximation techniques.

The calculation of the normal stiffness is based on Bandis et al. (1983) research. Figure 4.25 represents vertical displacement/normal stress vs. vertical displacement during the first phase of application of load, for all interfaces tested.

$$\frac{\Delta V_j}{\sigma_n} = q - r\Delta V_j \quad (4.17)$$

For each increment of σ_n the corresponding k_n value must be obtained from the derivative of Eq. 4.17

$$kn = \frac{1}{q} \left(1 - \frac{\sigma_n}{\frac{1}{r} + \sigma_n} \right)^{-2} \quad (4.18)$$

q and r constants are obtained from the plots of $\Delta V_j / \sigma_n$ vs. ΔV_j for each interface.

The values of q and r are show in Apenndix C, Table 1.3.

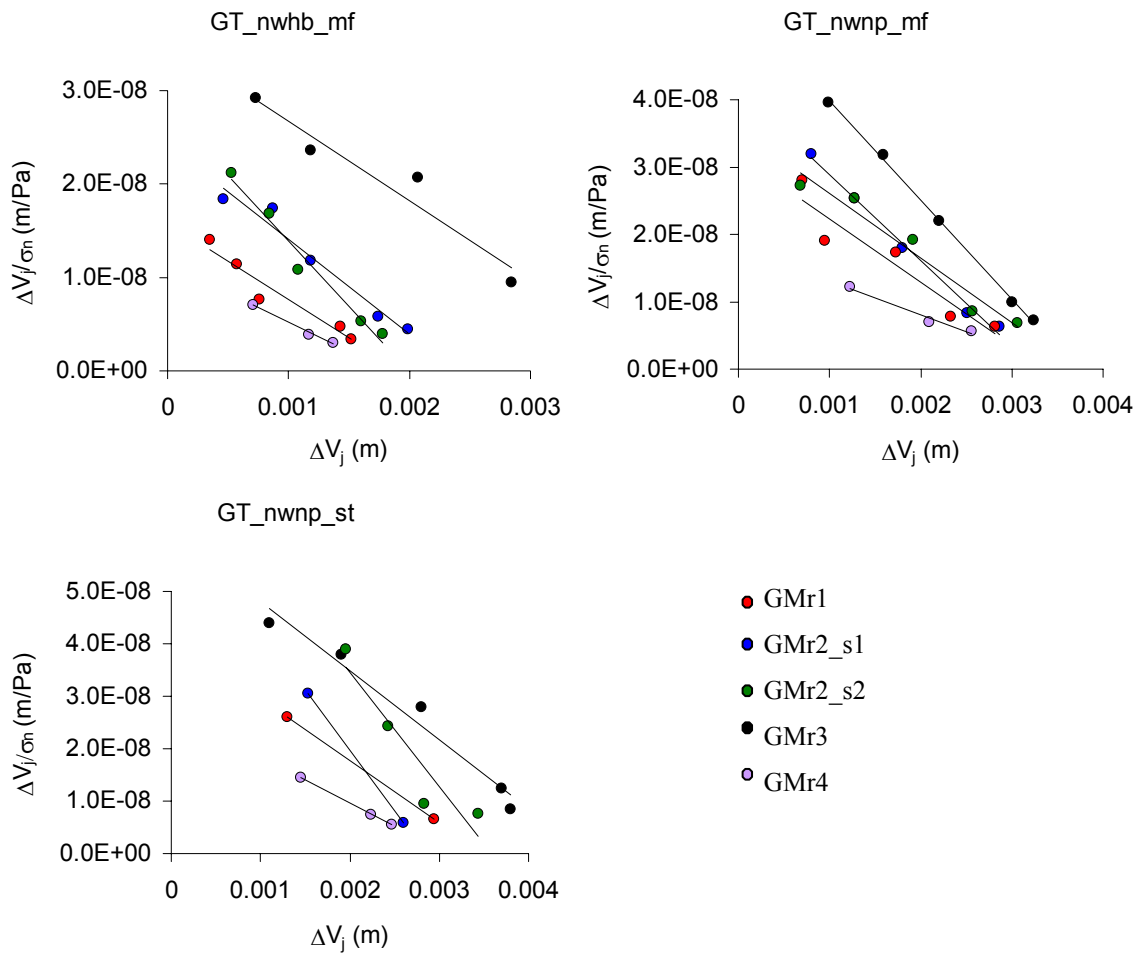


Figure 4.25 Linear plots of $\Delta V_j / \sigma_n$ vs ΔV_j for different interfaces types

To calculate shear stiffness (ks) is based on investigation of Barton and Choubey (1977). The peak shear stiffness is defined as the peak shear strength (τ) divided by δ_{peak} . This way, it is possible to obtain an estimated value of ks according to Eq. 4.19.

$$ks = \frac{1}{a + b\sigma_n} \sigma_n \tan \left[HLI \log \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right) + \phi_{residual} \right] \quad (4.19)$$

4.1.10 Comparison with measured data

Figure 4.26 shows examples of the shear stress data obtained from direct shear tests of texture geomembrane/geotextile interfaces and the shear strength model data obtained from a spreadsheet showed in Appendix D. In the upper and middle left hand diagram, four tests conducted on GMr3/GT_nwhb_mf and GMr1/GT_nwnp_mf interface at four normal stress levels are compared with the model (top and middle right diagram). In the

lower pair of diagrams, three tests run at three stress levels on GMr4/GT_nwnp_st interface are compared. Good agreement between the model and the test data is indicated. Therefore Figure 4.27 compare the peak and post peak shear stress obtained from the analytical model with the direct shear tests results. Usually the difference between the model and the test is smaller than $\pm 10\%$.

The rest of shear strength model curves, shear stress-displacement, and shear stress envelopes belong to tested geotextile/geomembrane interfaces are presented in the Appendix E.

It is important to consider that the shear strength model data have been compared with direct shear test data within the stress range $25 \leq \sigma_n \leq 450$ that is the range of stress operating in the experiments. Figure 4.28 shows the family of peak strength envelopes for GT_nwnp_mf/geomembranes, GT_nwhb_mf/geomembranes, and GT_nwnp_st/geomembranes interfaces predicted for values of HL , I , GCS and $\phi_{residual}$. The curves have been drawn with continuous lines for the range of stress: $25 \leq \sigma_n \leq 450$ kPa. Dotted lines have been used in case there is uncertainty about the practical relevance of the curves, as for the range of stress $\sigma_n > 450$ kPa. The uncertainty connected with high values of normal stress is due to lack of experiments for this range of stress. This way testing would be necessary to justify or disregard the extrapolation.

One supposed choice about the form of the peak failure envelopes for high normal stress is the asperities of the geomembranes can be damaged under high normal stress (Giroud, 2003). Therefore, from 400-450 kPa the peak failure envelope may slightly increase, but not suddenly. To simulate this fact it is necessary that hook and loop, and interbedding parameters will be affected with damage coefficient, supposing this coefficient as $400/(\sigma_n \geq 400)$, where σ_n is the applied normal stress, the resulting peak failure envelopes are showed in Figure 4.29. But testing would be necessary to justify or disregard this supposition.

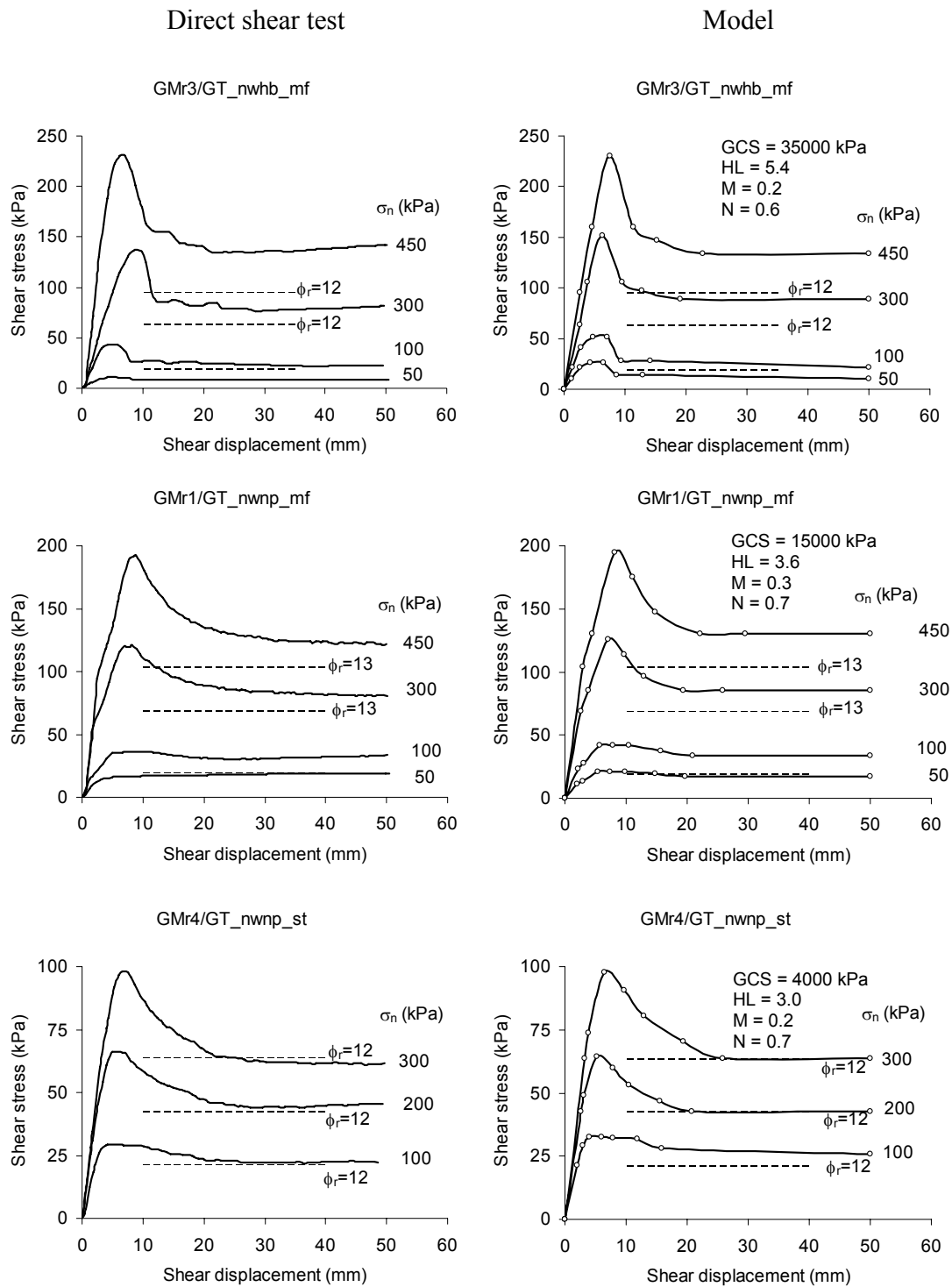


Figure 4.26 Comparison of shear stress-displacement data obtained from shear strength models and direct shear tests

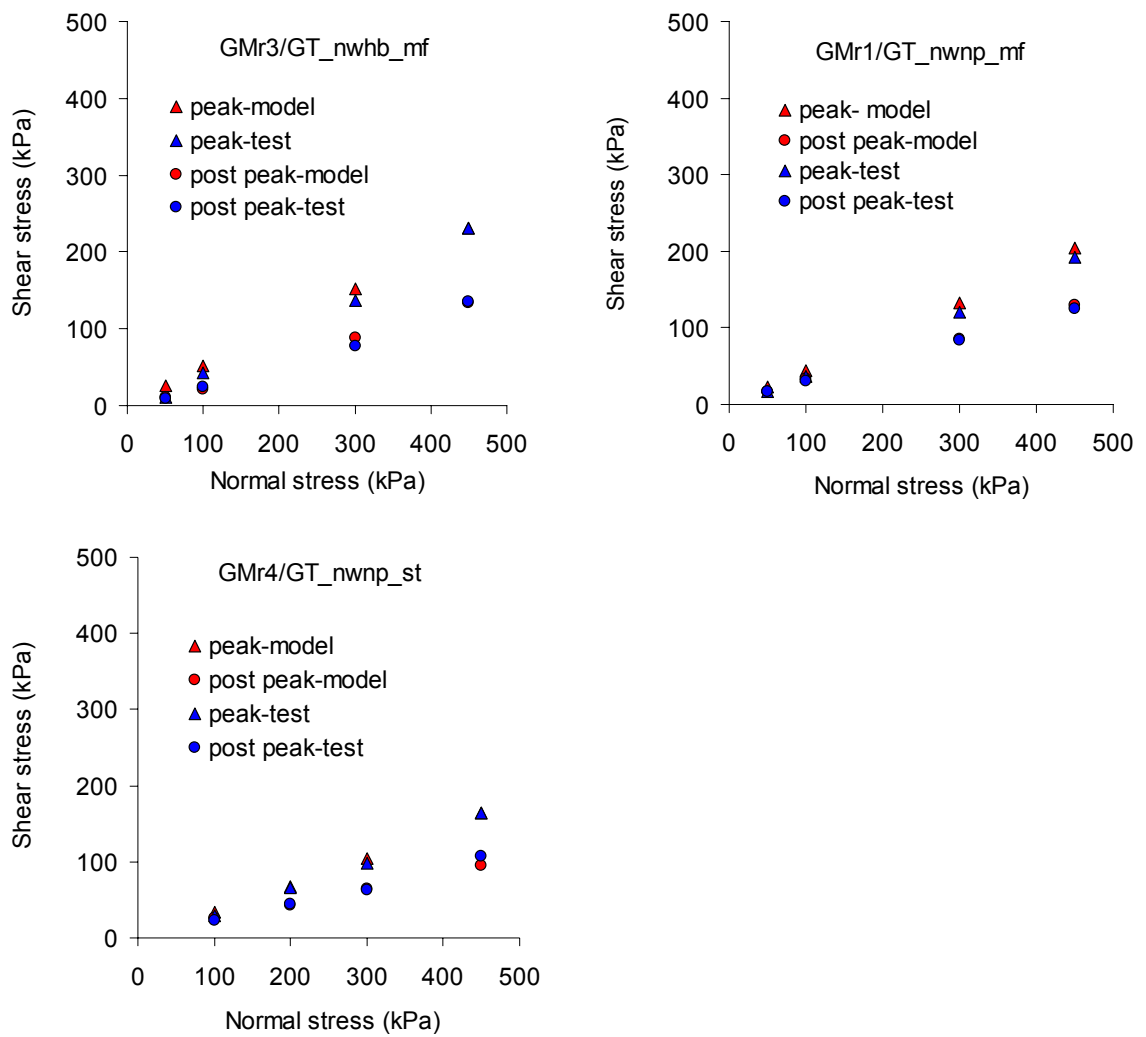


Figure 4.27 Comparison of peak and post-peak shear strength models with direct shear tests results of rough geomembrane/nonwoven geotextile interfaces. The post-peak shear stress value is for a horizontal displacement of 50 mm

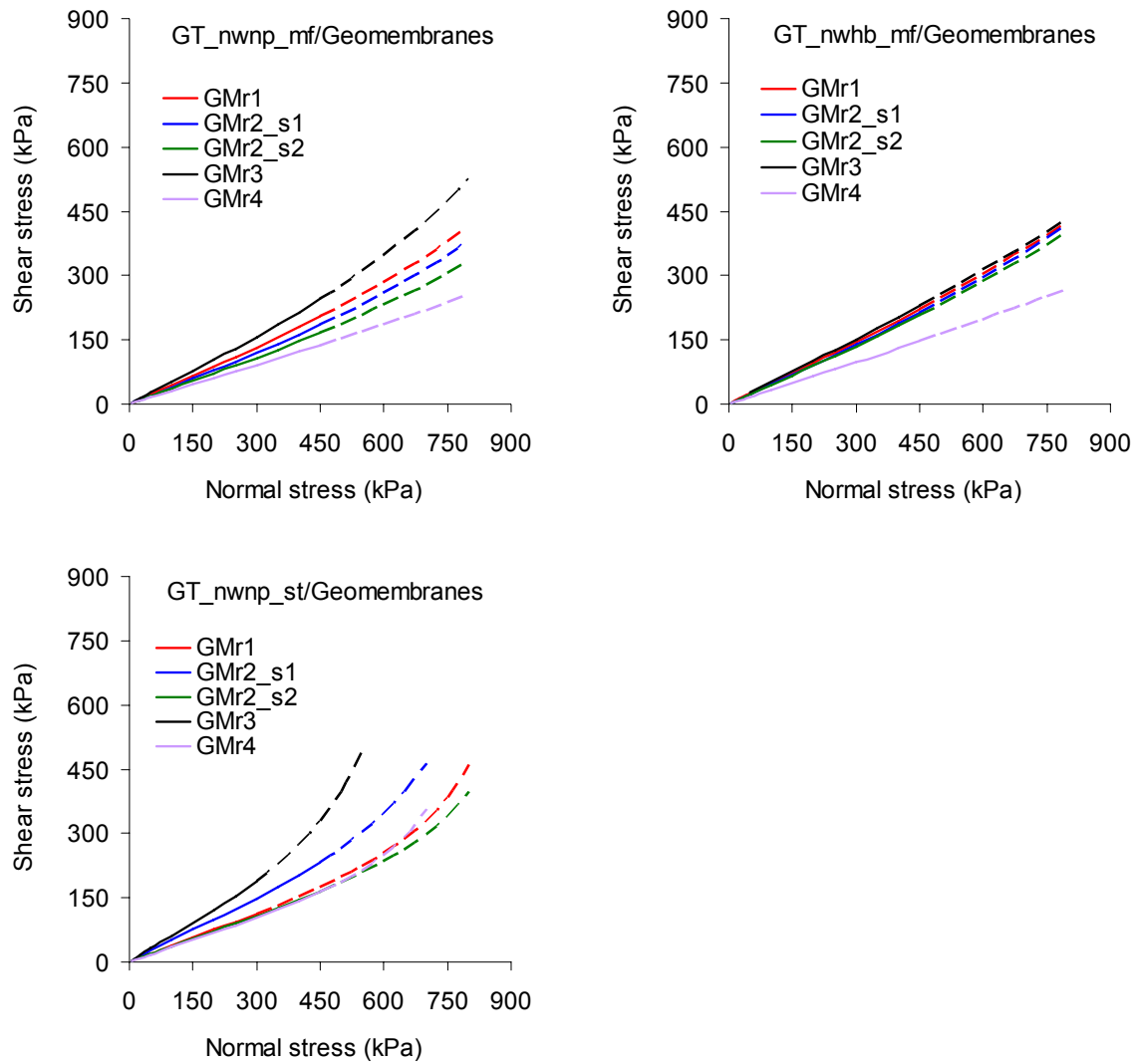


Figure 4.28 Family of peak strength envelopes for rough geomembranes/nonwoven geotextiles obtained having the given HL , I , GCS and $\Phi_{residual}$ values

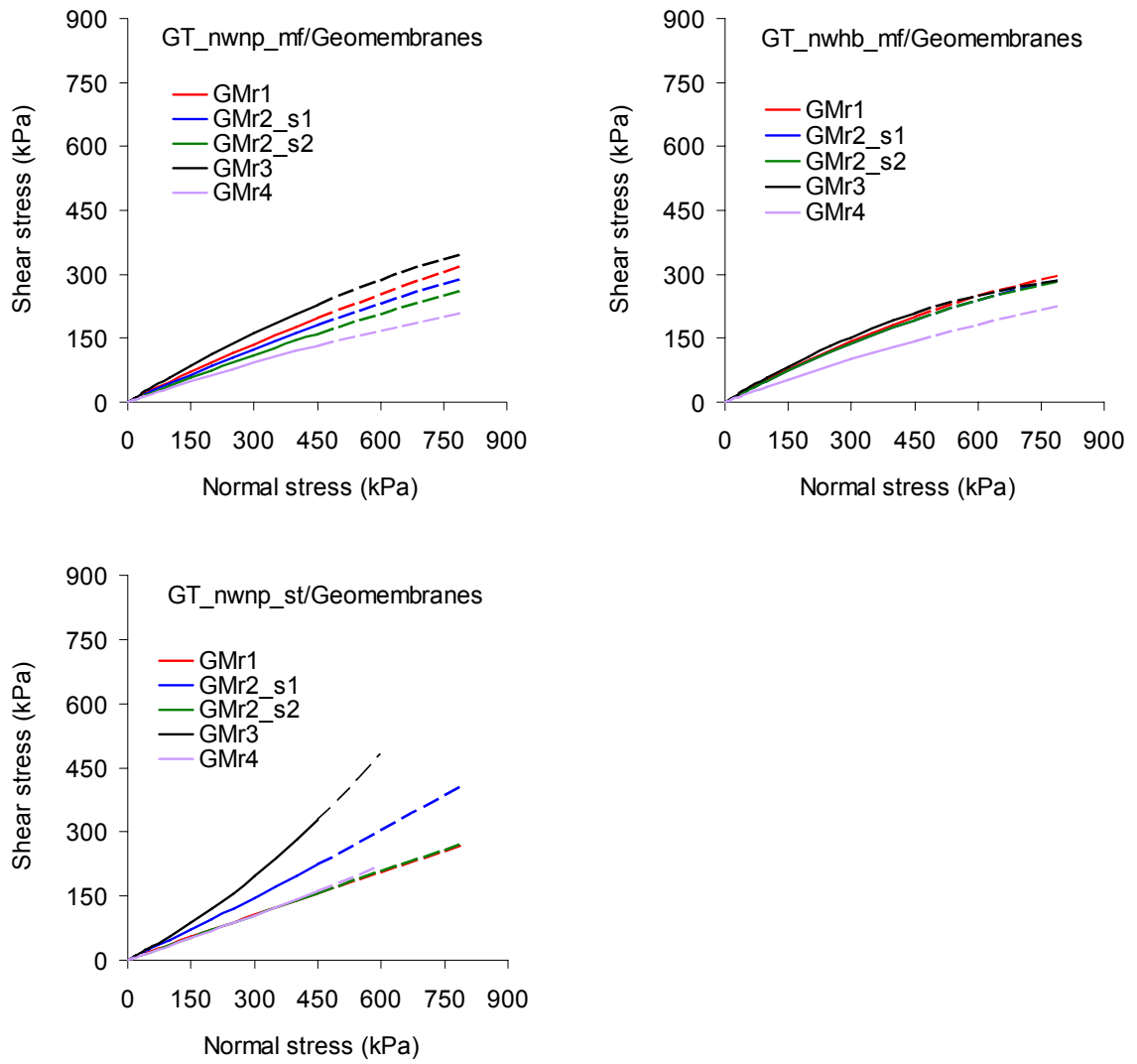


Figure 4.29 Supposed trend of the peak failure envelopes from high normal stress

4.2 Numerical analysis

To carry out numerical analysis the code FLAC^{3D} (ITASCA 2007) was used because it can study the mechanical behaviour of a continuous medium as it reaches equilibrium or steady flow. FLAC^{3D} is a three-dimensional explicit finite-difference program to solve mechanical and Hydro-Thermal-Mechanical coupled problems.

4.2.1 Steps to perform the Geomembrane/geotextile direct shear model

The purpose of the direct shear model is to simulate the physical response of the geomembrane/geotextile interface subjected to normal and shear loading. The model represents a direct shear test, which consists of a horizontal contact plane between two geosynthetics that is first subjected to a normal confining stress, and then to a unidirectional shears displacement (Figure 4.30).

The procedure to get the numerical solution of the direct shear model is illustrated in Figure 4.31. The grid defines the geometry of the problem. The constitutive behaviour and associated material properties dictate the type of response the model will display upon disturbance (shear stress response due to shear displacement). Boundary and initial conditions define the in-situ state (i.e., the condition before a change or disturbance in the problem state is introduced). After these conditions are defined in FLAC^{3D}, the initial equilibrium state is calculated. And alteration is then made (change of boundary conditions), and the resulting response of the model is calculated. Next the distinct stages of the procedure are discussed separately.

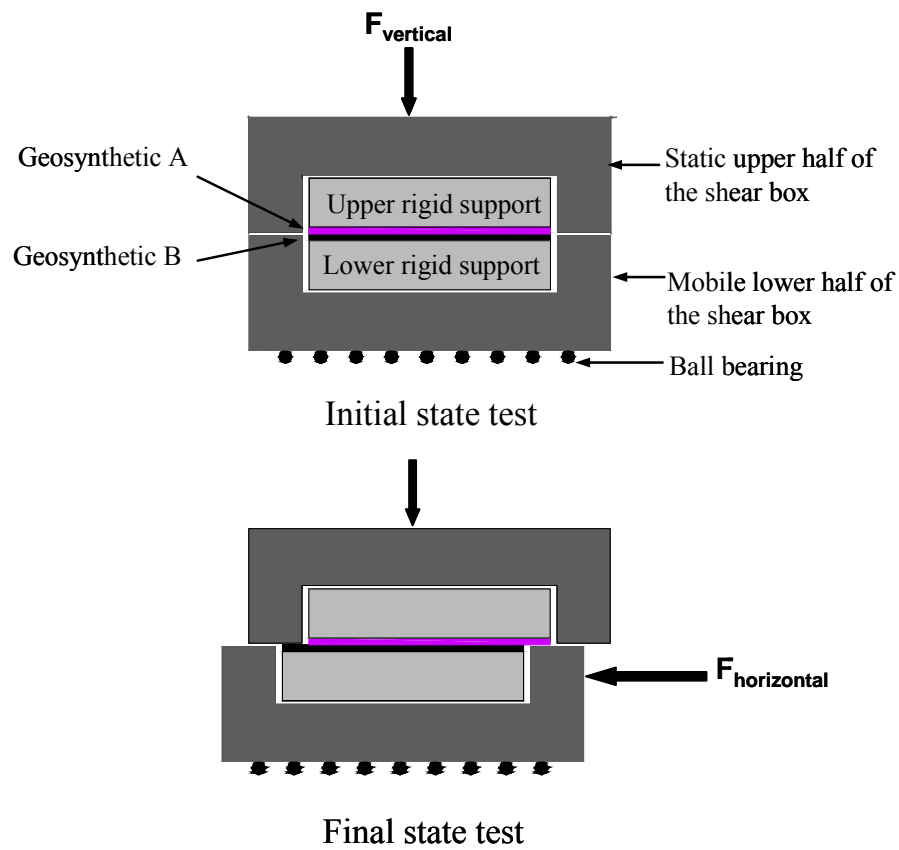


Figure 4.30 Sketch large direct shear test of the geosynthetic/geosynthetic interface

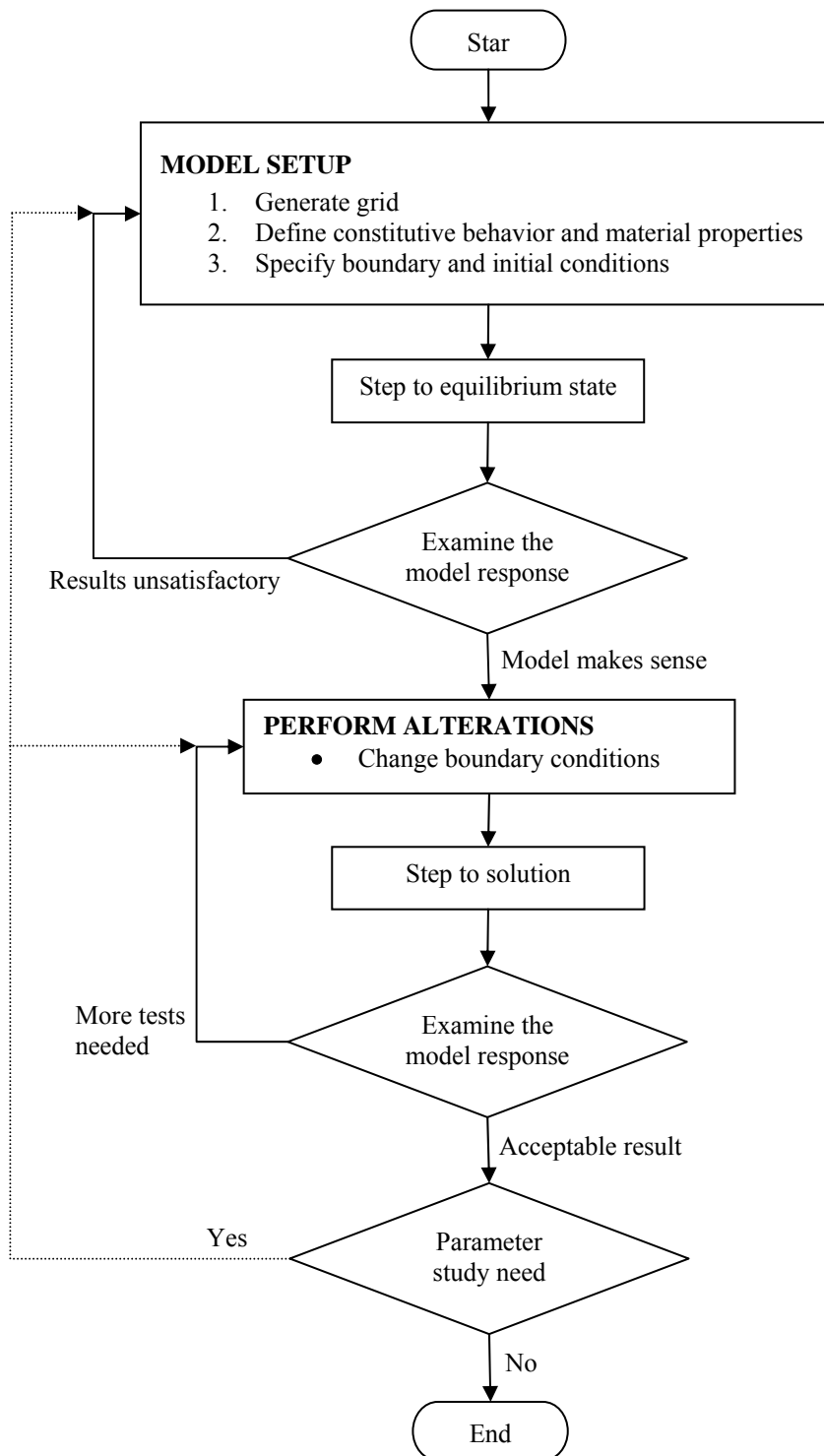


Figure 4.31 General solution procedure using FLAC^{3D} (ITASCA 2007)

MODEL SETUP

1. Design of the geometry: to model the geosynthetics two sub-grids are used, one is the geomembrane (top sub-grid) and another is the geotextile (bottom sub-grid). The size of the geotextile sample is 310mm x 310mm x height mm. The size of the geomembrane sample is 300 x 300 x height mm. The mesh that models both materials is ten zones in the x -direction, ten zones in the y -direction and five zones in the z -direction. The z -axis is oriented in the vertical direction. The zones are brick shape. Figure 4.32 and Figure 4.33 show the model grid.
2. An interface is used to represent the contact plane between the geomembrane and the geotextile (see Figure 4.34 and Figure 4.35)

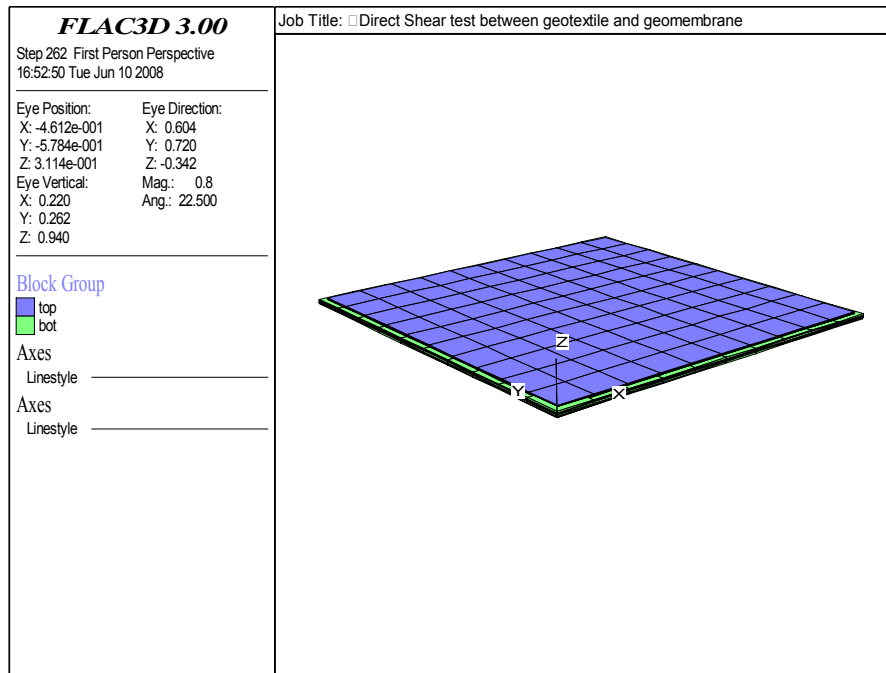


Figure 4.32 Brick-type mesh for direct shear test model

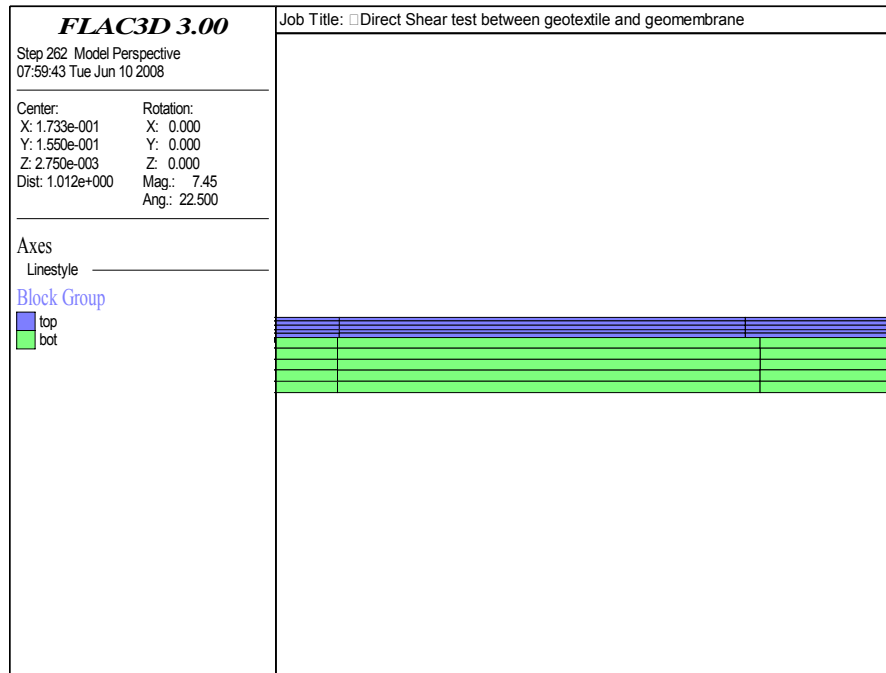


Figure 4.33 Zoomed front view brick-type mesh for direct shear test model

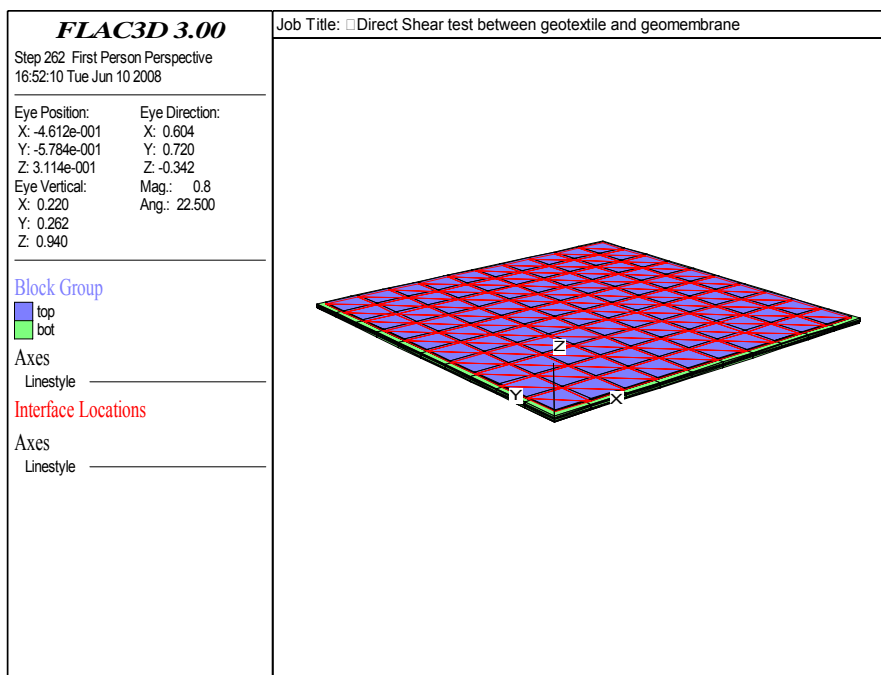


Figure 4.34 Interface between two sub-grids

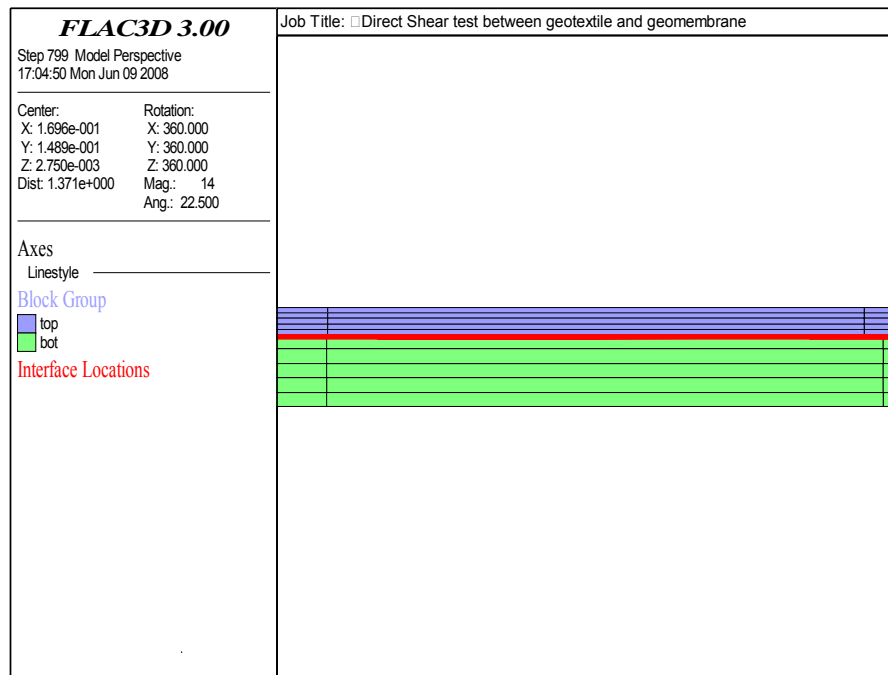


Figure 4.35 Front view with interface between two sub-grids

3. Material behaviour: the elastic isotropic model is used for both geosynthetics, because the geosynthetics are loaded below their strength limit. The interface is defined by a linear Coulomb shear-strength criterion, and elastic normal and shear stiffnesses (ITASCA 2007). The normal and shear stiffnesses are put in by a FISH function, because they depend on normal stress applied among other parameters. The following constants are used in the model:

Isotropic elastic model—Geotextile and geomembrane

- (1) **bu** elastic bulk modulus, K
- (2) **sh** elastic shear modulus, G

Mohr Coulomb model—Interface

- (3) **fric** internal angle of friction, ϕ
- (4) **kn** normal stiffness (stress/displacement)
- (5) **ks** shear stiffness (stress/displacement)
- (6) **_q** constant fit line (normal stiffness-normal stress, according to Figure 4.25)
- (7) **_r** constant fit line (normal stiffness-normal stress, according to Figure 4.25)
- (8) **_a** constant fit line (peak displacement-normal stress, ApenndixC, Table 1.8)
- (9) **_b** constant fit line (peak displacement-normal stress, ApenndixC, Table 1.8)
- (10) **_hl** hook and loop, according to Figure 4.13

- (11) **_gcs** geotextile reference compression stress, Table 4.5
- (12) **_rfric** residual friction angle, Apenndix C, Table 1.4)
- (13) **_m** interbedding fit constant, according to Figure 4.14, Figure 4.15 and Figure 4.16
- (14) **_n** interbedding fit constant, according to Figure 4.14, Figure 4.15 and Figure 4.16

In the shear phase: the constants (6) and (7) are used to obtain the normal stiffness. The constants from (8) to (14) are used to obtain the shear stiffness and internal angle of friction. A FISH function defines the normal and shear stiffness and internal angle of friction.

4. Boundary conditions: the geotextile is glued to a rigid metal box, therefore the plane $z=0$ of the bottom sub-grid does not move, this plane has fixed displacements in x, y, z -directions. After normal stress is applied, the upper face of the geomembrane is fixed to rigid metal plate, and along the shear direction the geomembrane only moves in x -direction, therefore the upper face of the geomembrane has fixed displacements in z , and y -directions. Figure 4.36 and Figure 4.37 show the fixity conditions of the top sub-grid and bottom sub-grid, respectively.

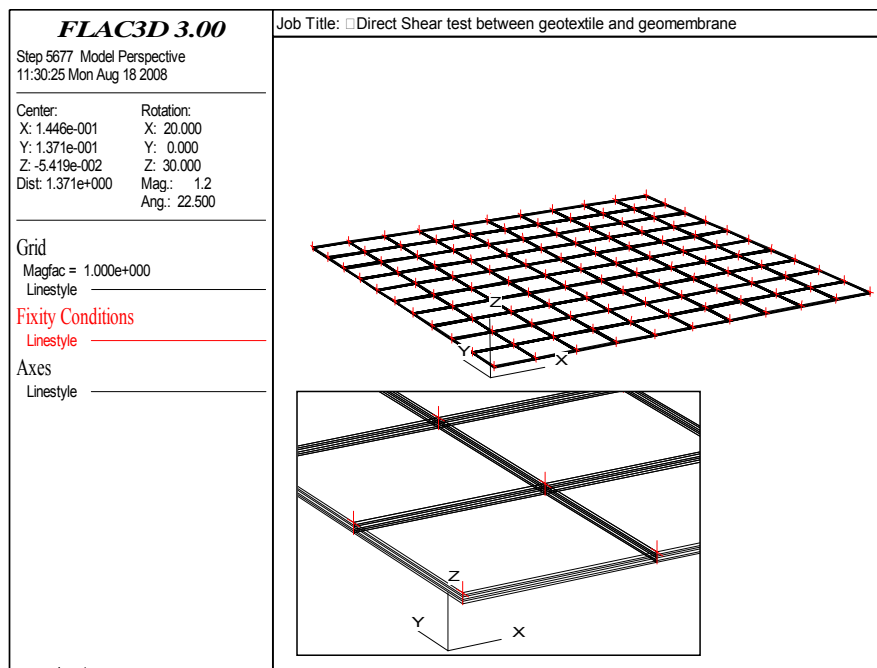


Figure 4.36 Fixed displacements in y and z -directions at the upper face of the top sub-grid during shear phase

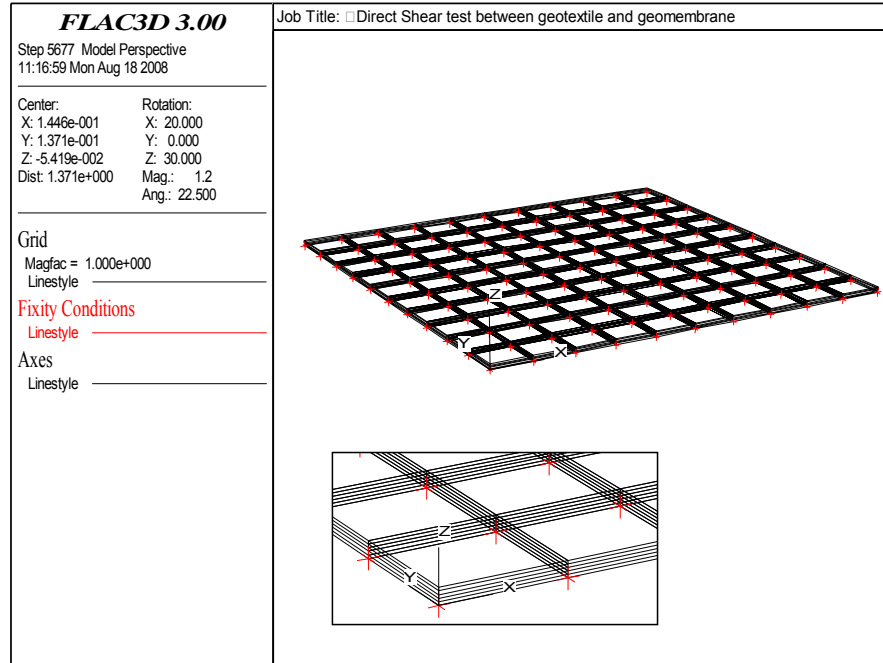


Figure 4.37 Fixed displacements in x , y and z -directions at the lower face of the bottom sub-grid during shear phase

- Initial conditions: before the shear started, a normal stress is applied. The normal stress is applied as a vertical uniform stress on upper face of the top sub-grid. The stresses achieve the equilibrium as just it can be seen in Figure 4.38, Figure 4.39.

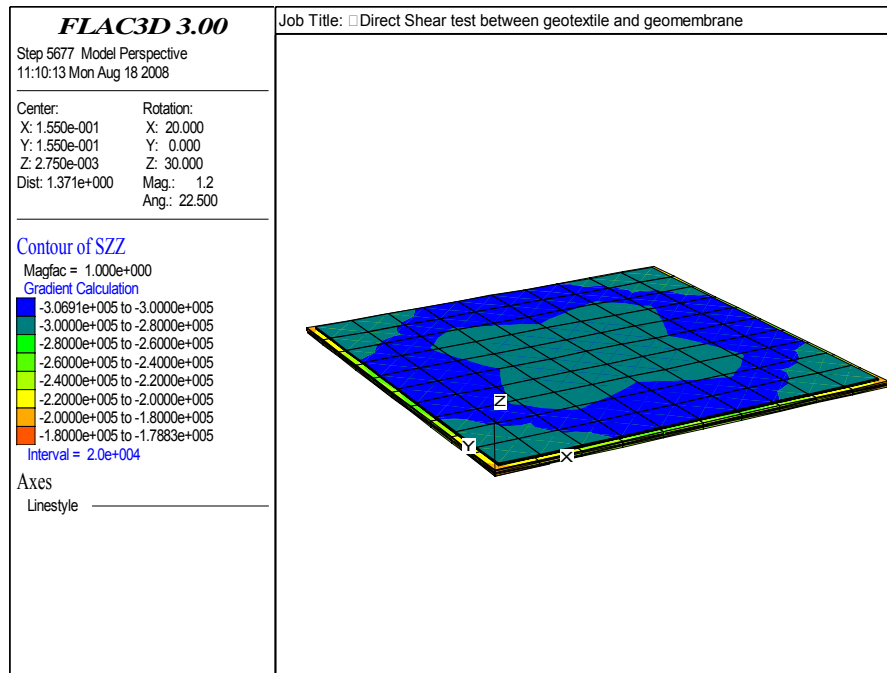


Figure 4.38 Normal stress (Pa) contours in the direct shear model

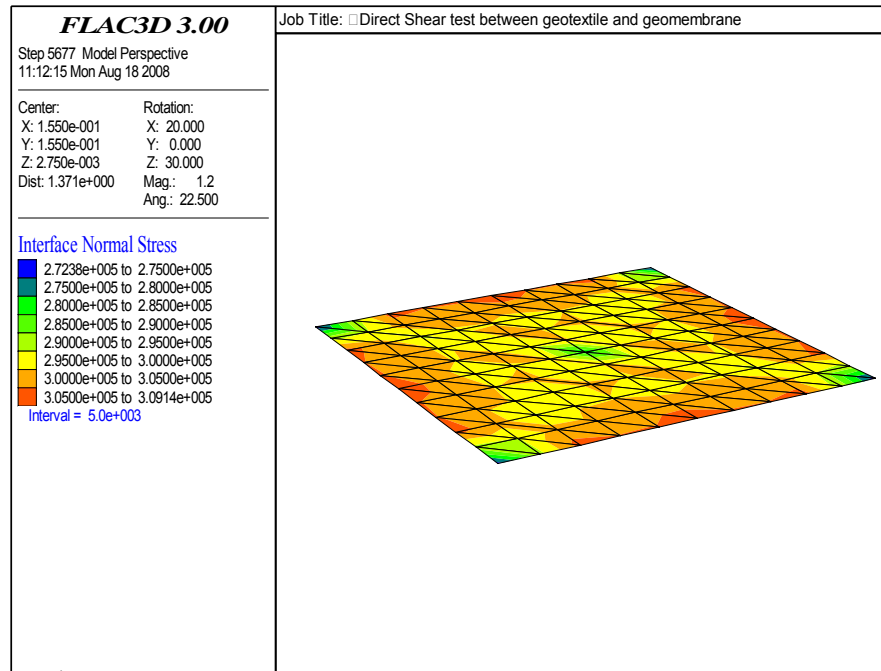


Figure 4.39 Normal stress (Pa) in the interface

MODELLING PROCEDURE

The direct shear test is simulated by applying a horizontal velocity to the top sub-grid, to produce a shear displacement along the interface. The shear stress and shear displacement along the interface are measured by FISH function. The FISH functions use a dimensionless TABLE, like Table 5.6, for each interface type (see Appendix C) to calculate the variation of friction with accumulated plastic shear for the strain-softening model using the Equation 4.13. Figure 4.40 shows the model.

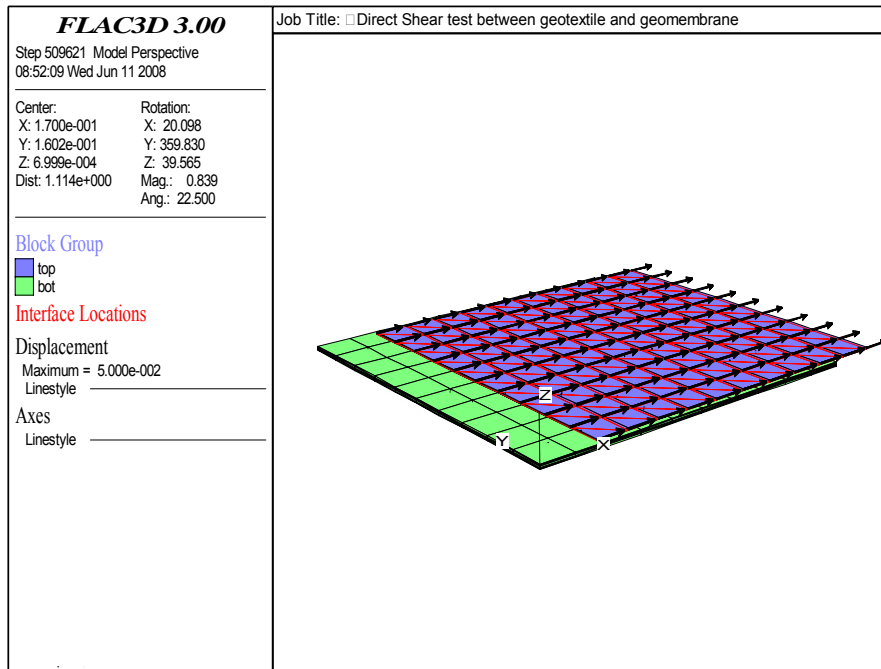


Figure 4.40 Direct shear test model

The results are presented graphically to directly compare to results of direct shear tests, shear stress versus shear displacement (**sstav** vs. **sjdisp**). Furthermore, the shear stress and shear displacement variables are recorded in a file **.his** to use these values by a commercial spreadsheet package. Figure 4.41 shows the shear stress versus shear displacement of the model runs. The data file is presented in Apenndix F.

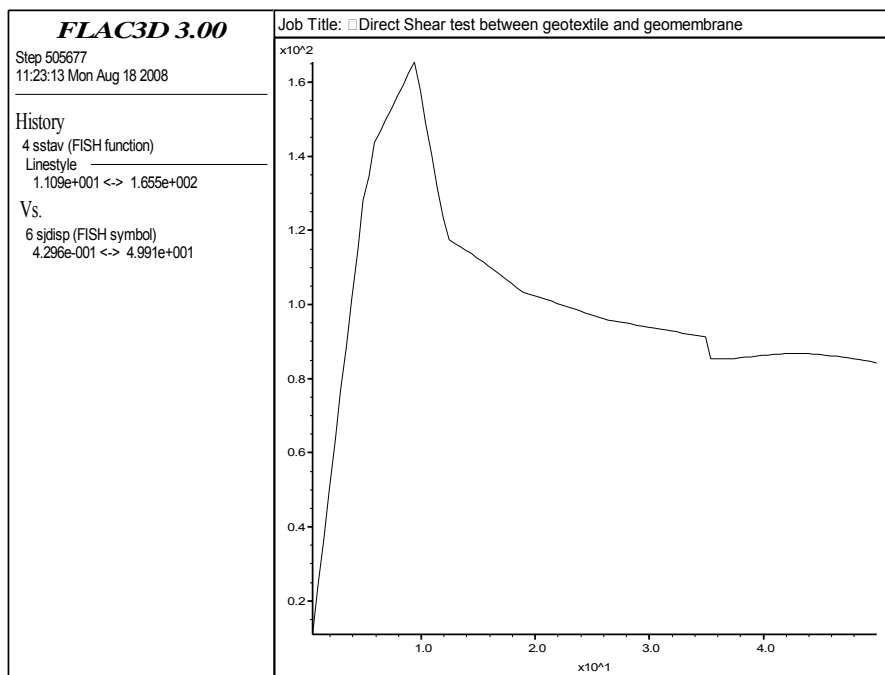


Figure 4.41 Shear stress versus shear displacement

4.2.2 Interpretation of results

The system is stable, unstable, or in steady-state plastic flow?

The unbalanced force is an indicator to assess if the numerical model is stable or unstable. In the phase of normal stress application, the initial maximum unbalance force is 123.5 N. After 4000 steps, this force has dropped to approximately 0.03 N. The equilibrium state is considered to be achieved when the ratio of the maximum unbalanced mechanical force magnitude for all gridpoints in the model divided by the average applied mechanical force magnitude for all the gridpoints in the model drops below the value of 1×10^{-5} . In this case $0.03/27000 = 1.1 \times 10^{-6}$. The unbalance of force history is plotted in Figure 4.42.

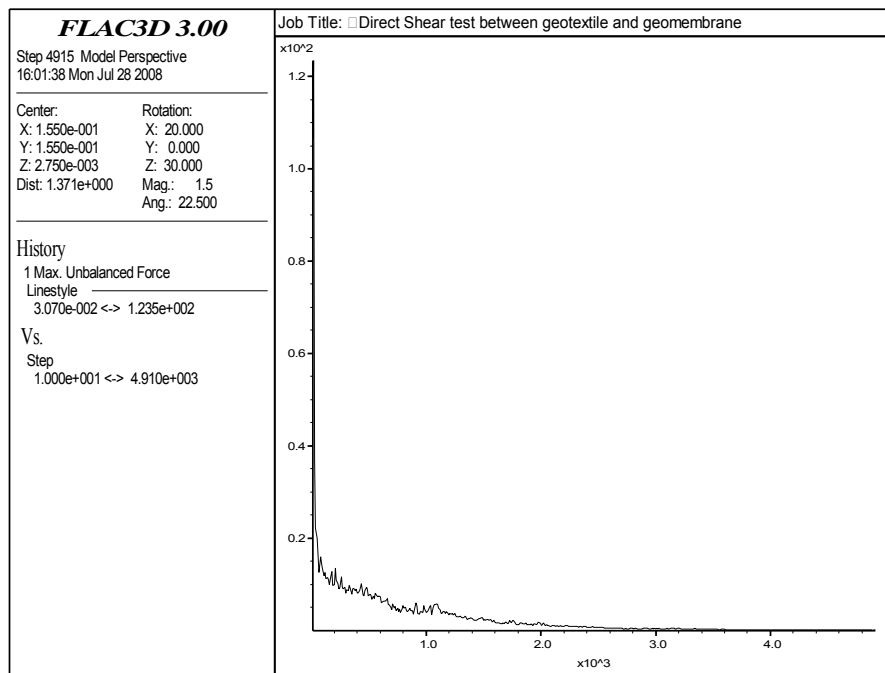


Figure 4.42 Maximum unbalance force (F_n) during normal stress application

Figure 4.43 illustrates the field of velocity vectors. It shows that in the shear phase a continuing plastic flow is occurring in x -direction.

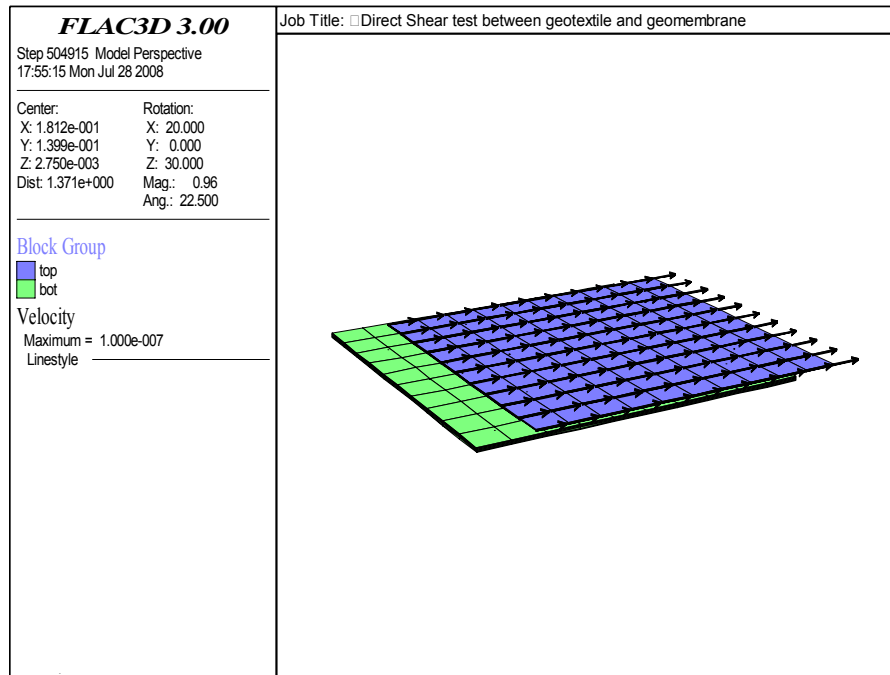


Figure 4.43 Velocity (m/calculation step) vectors in shear model

Figure 4.44 shows the shear stress-shear displacement curve. The loading is initially linear, and then becomes nonlinear as interface begins to fail until the peak shear strength, after that the shear strength decreases up to post-peak (residual) value. The plot also indicates whether stresses within a zone are currently on the yield surface (black points) or the zone has failed on the past (red points). Figure 4.45 shows interface normal stress distribution at the end of the test. A normal stress increase exists on the left edge due to edge effect, but it does not affect to the results.

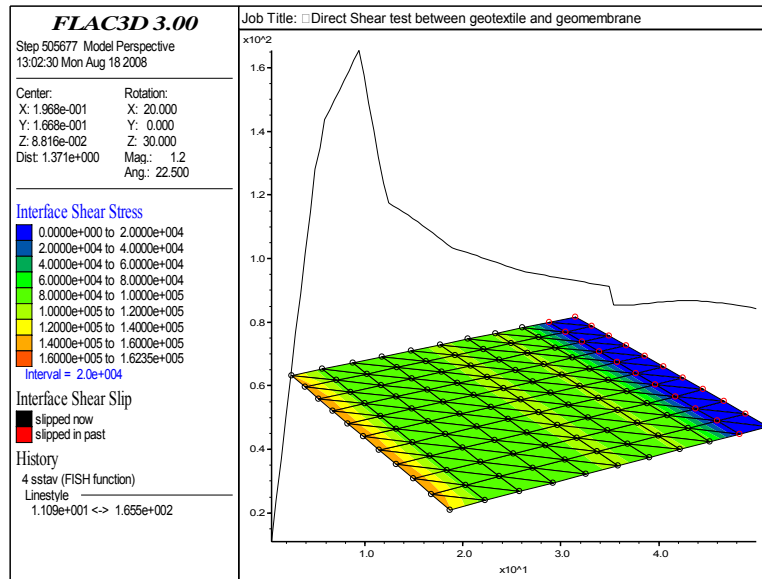


Figure 4.44 Interface shear stress (Pa)

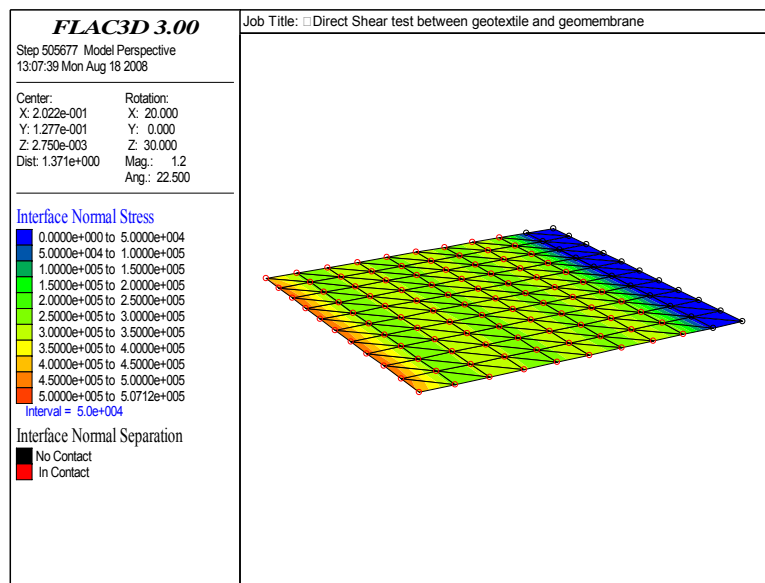


Figure 4.45 Interface normal stress at the end of the test (Pa)

4.2.3 How obtain the constants of the direct shear model?

Parameters for geotextile:

To obtain bulk and shear modulus it is necessary to know the modulus of elasticity (E) and the Poisson's ratio (ν). The Young's modulus can be obtained from the stress vs. strain curve of the tensile strength test, EN ISO 10319. This way, E modulus can be calculated by the following way (Koerner, 1998):

- Initial tangent modulus. It is the slope of initial portion of the stress-strain curve for GT_nwnp_mf and GT_nwhb_mf.
- Offset tangent modulus. This concept is used when the initial slope is very low and is typical of nonwoven needle-punched geotextile. To obtain the value, we avoid the initial portion of the curve and essentially shift the y -axis to the right, where it meets the downward extension of the linear portion of the response curve. The slope is the taken from this adjusted axis location

This way bulk and shear modulus K and G can be calculated:

$$\text{Bulk modulus is } K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4.20)$$

$$\text{Shear modulus is } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.21)$$

A Poisson's ratio of $\nu = 0.01$ is assumed because the horizontal deformation is insignificant. This fact was confirmed by the compressibility test, ISO 9863-1:2005 explained above. Table 1.1 (Appendix C) shows the values, E , K and G for the different geotextiles.

Parameters for geomembrane:

As for the geotextiles the E modulus is the slope of the initial portion of the stress-strain curve obtained from the test method DIN EN ISO 527 or ASTM D 6693. Employing a Poisson's ratio, $\nu = 0.46$ because the geomembranes are made of HDPE, see Figure 4.46, and using Eq. 4.20 and Eq. 4.21 bulk and shear modulus were calculated (see Appendix C, Table 1.2)

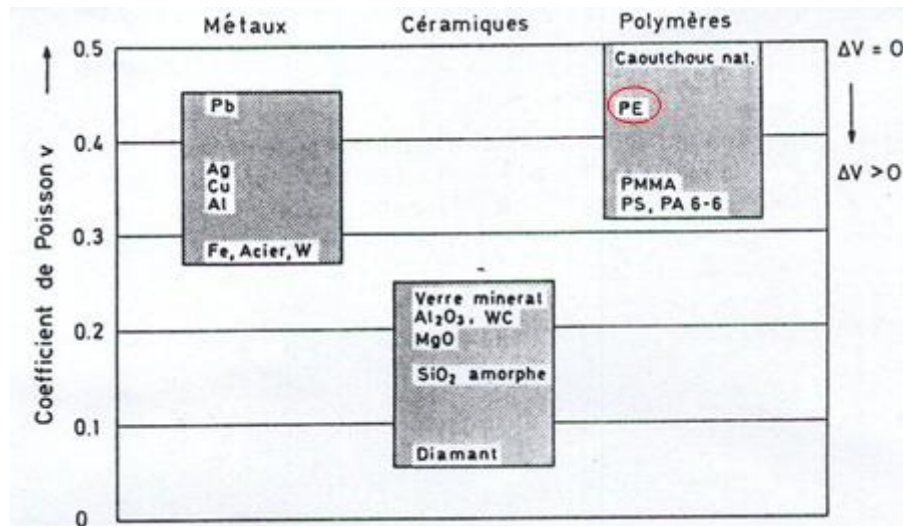


Figure 4.46 Poisson's ratio for different materials

Parameters for interface:

The parameters of the interface: $_q$, $_r$, $_a$, $_b$, $_hl$, $_gcs$, $_rfric$, $_m$, $_n$, kn , and ks are explained in the section 4.2.1. Regarding the parameters: $fric$, kn , and ks it is necessary to take the following aspects into account:

- At the beginning the friction angle, $fric$, should be very high along normal stress application to avoid any shear displacement.
- This model simulated a real interface that simply needs to provide a means for one sub-grid to slide relative to another sub-grid. The friction is important, but the elastic stiffness is not (ITASCA 2007). If the physical normal and shear stiffness of the interface are less than the neighbouring zones then the stiffness of the interface should be increased. Therefore to introduce the value kn and ks were multiplied per 1000 and 10000 respectively.

4.2.4 Comparison with measured data

Figure 4.47 shows examples of the shear stress-displacement data obtained from different geotextiles/geomembranes interfaces: GT_nwhb/GMr3, GT_nwnp_mf/GMr1 and GT_nwnp_st/GMr4. These interfaces were tested at different normal stress levels and compared with the numerical model (right diagram). Good agreement between the numerical model and the direct shear test is indicated.

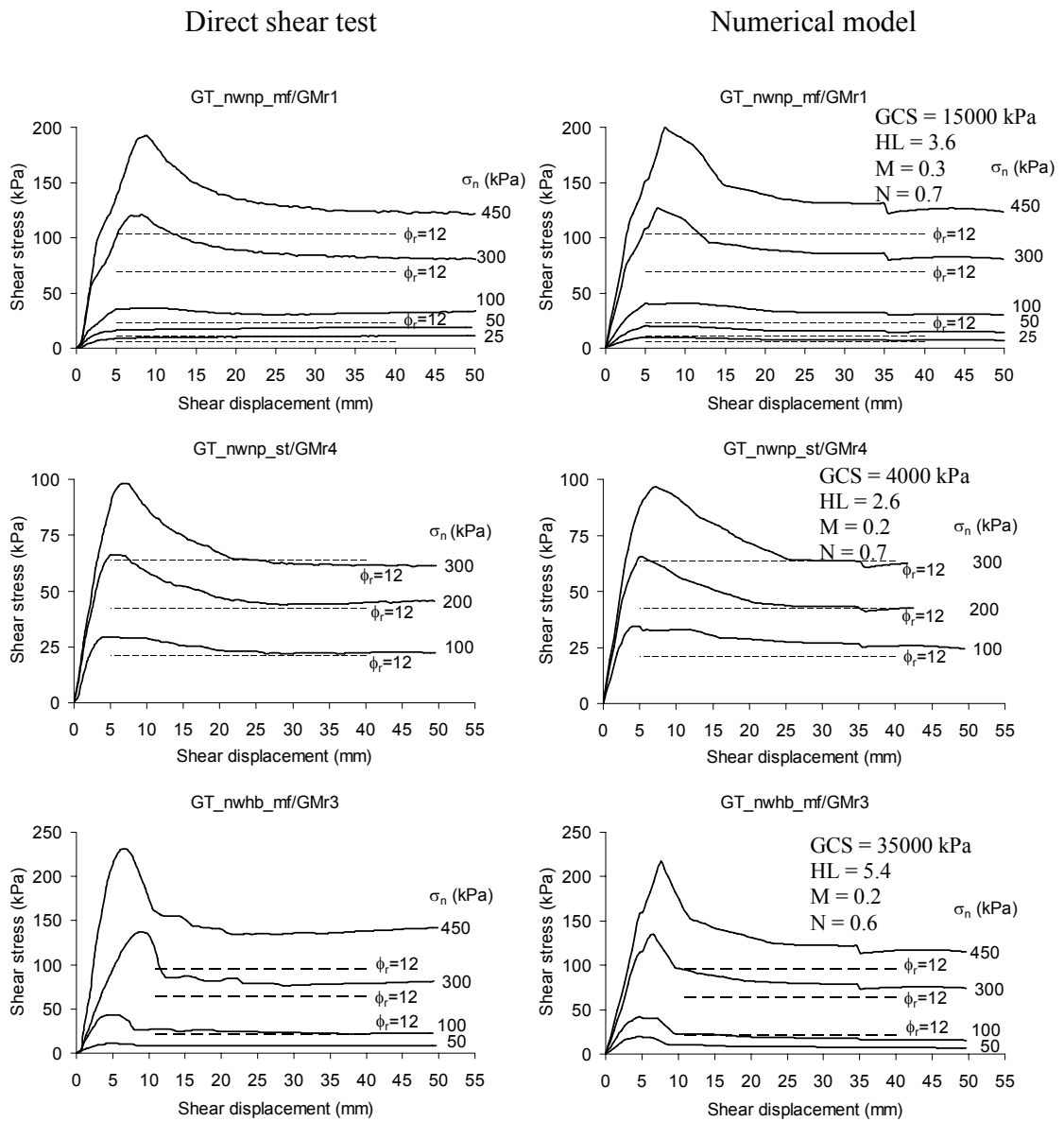


Figure 4.47 Comparison of shear stress-displacement data obtained from numerical models and direct shear tests

4.2.5 Different analysis of the direct shear numerical model changing the geometry, initial and boundary conditions

In this section the same direct shear test for GT_nwnp_mf/GMr3 interface at normal stress of 300 kPa is studied but with changing the geometry, initial and boundary conditions to check how these aspects affect to the results.

Changing the geometry

To take care that both of the geosynthetics are completely in contact along the direct shear test the geometry was changed. The size of the bottom sub-grid is: 420 mm x 300 mm x thickness mm of the geotextile, and the top sub-grid is: 300 mm x 300 mm x thickness mm of the geomembrane. Figure 4.48 and Figure 4.49 show normal stress distribution on the geomembrane and in the interface, respectively. There are no big differences compared with “*small model*” (Figure 4.38 and Figure 4.39). Figure 4.50 show the large model at the end of the test, the geomembrane is always in contact with the geotextile. Figure 4.51 show interface shear stress versus horizontal displacement. The peak shear stress value of 171 kPa is slightly higher than the value of 165.5 kPa in the “*small model*”.

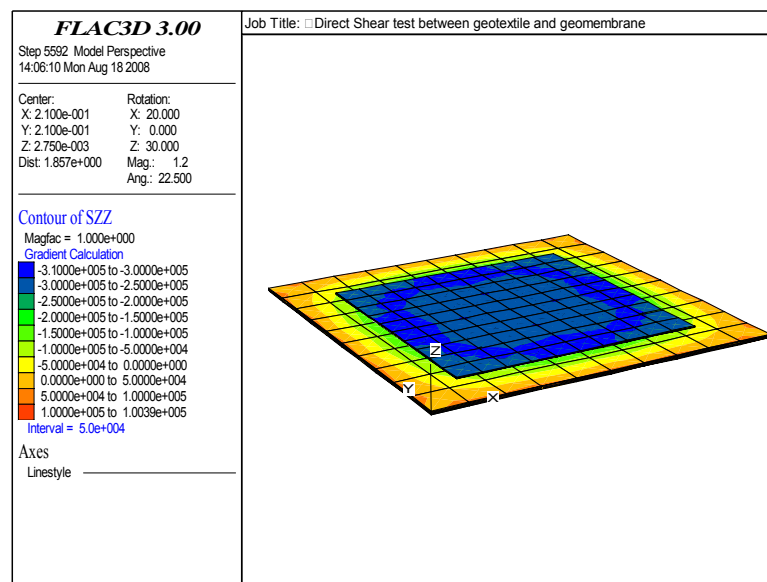


Figure 4.48 Normal stress (Pa) application in the “*large model*”

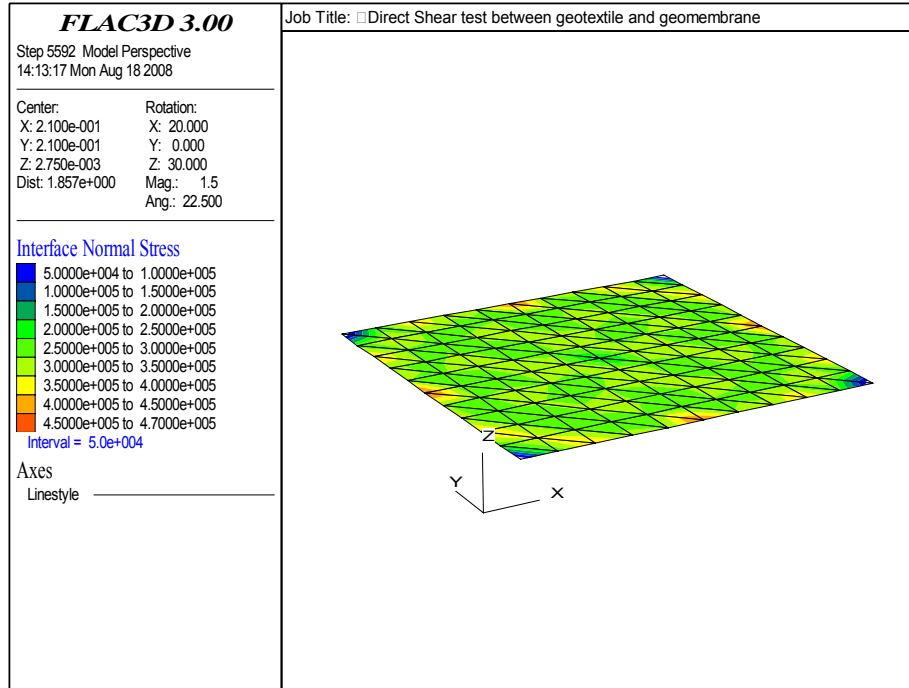


Figure 4.49 Interface normal (Pa) stress from “large model”

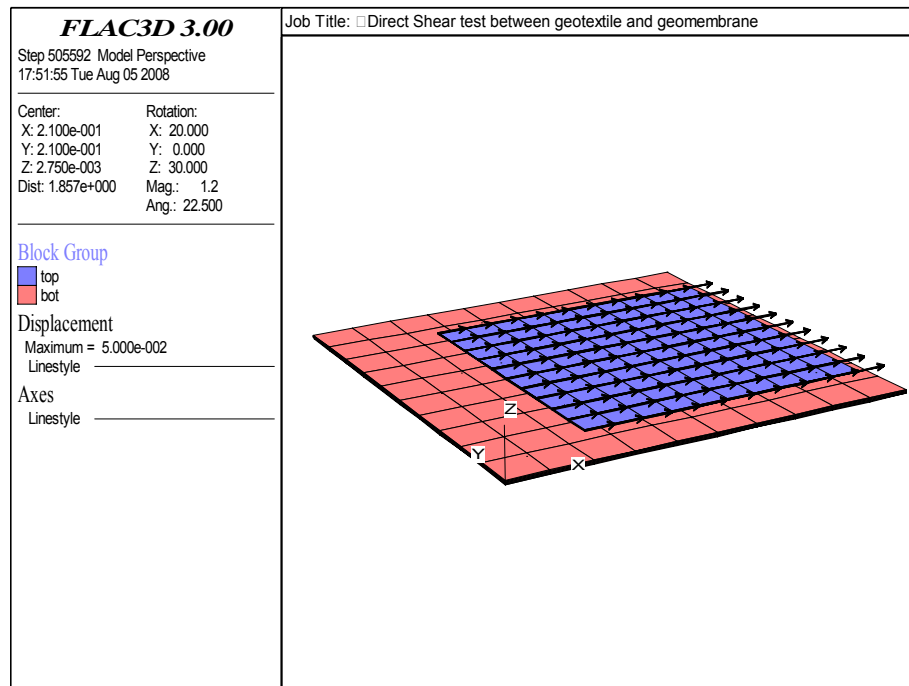


Figure 4.50 Direct shear test from “large model”

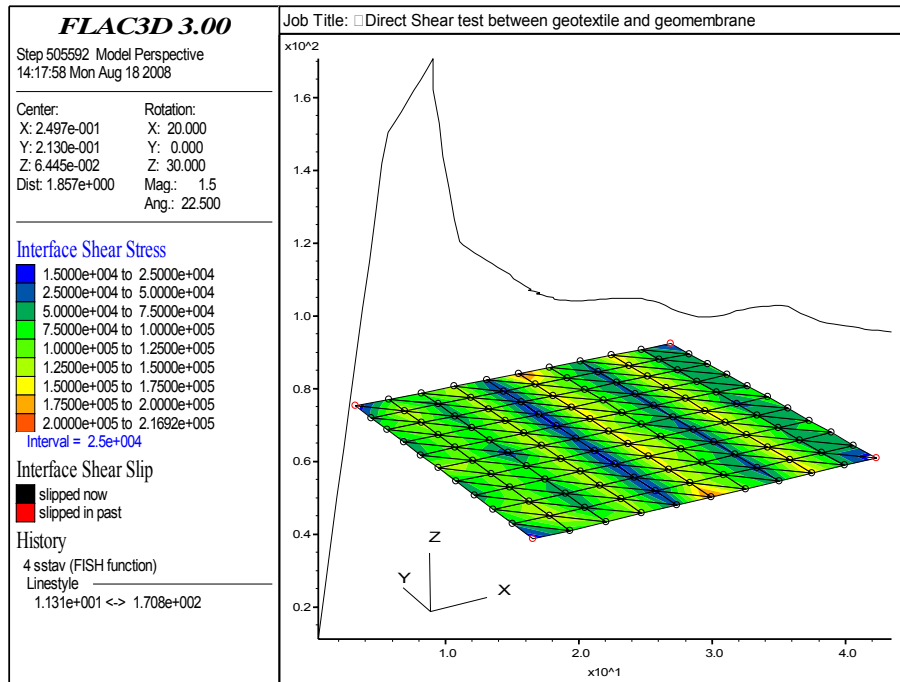


Figure 4.51 Interface shear stress (Pa) from “large model”

Uniform settlement to achieve resulting vertical load of 27 kN

In the model the normal stress is applied as uniform vertical stress on the upper face of the top sub-grid. In the real test the application of normal stress is different. To a rigid metal plate uniform settlement is applied with resulting vertical load of 27 kN. This initial and boundary conditions were applied in the model. Next figures show the results. Figure 4.52 and Figure 4.53 show normal stress distribution on the geomembrane and in the interface, respectively. Figure 4.54 represents shear stress-horizonal displacement curve. It is similar to the results obtained when uniform normal stress is applied on the top sub-grid (Figure 4.44). So the way how normal stress is applied has no significant influence on the final results.

Figure 4.55 shows the shear stress-horizonal displacement for different cases studied. All curves present similar results.

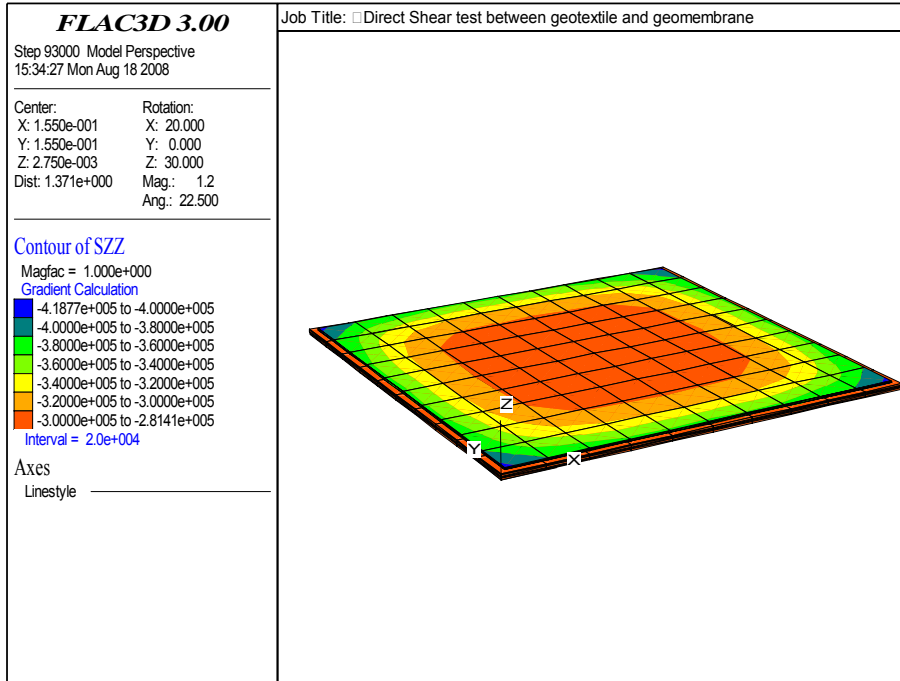


Figure 4.52 Normal stress (Pa) application from model with uniform settlement

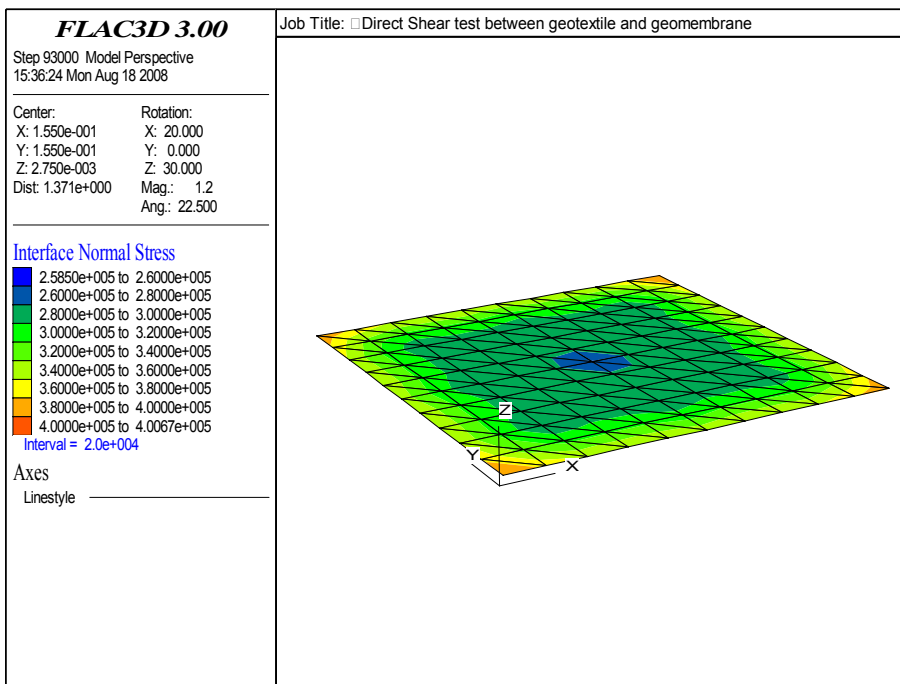


Figure 4.53 Interface normal stress (Pa) from model with uniform settlement

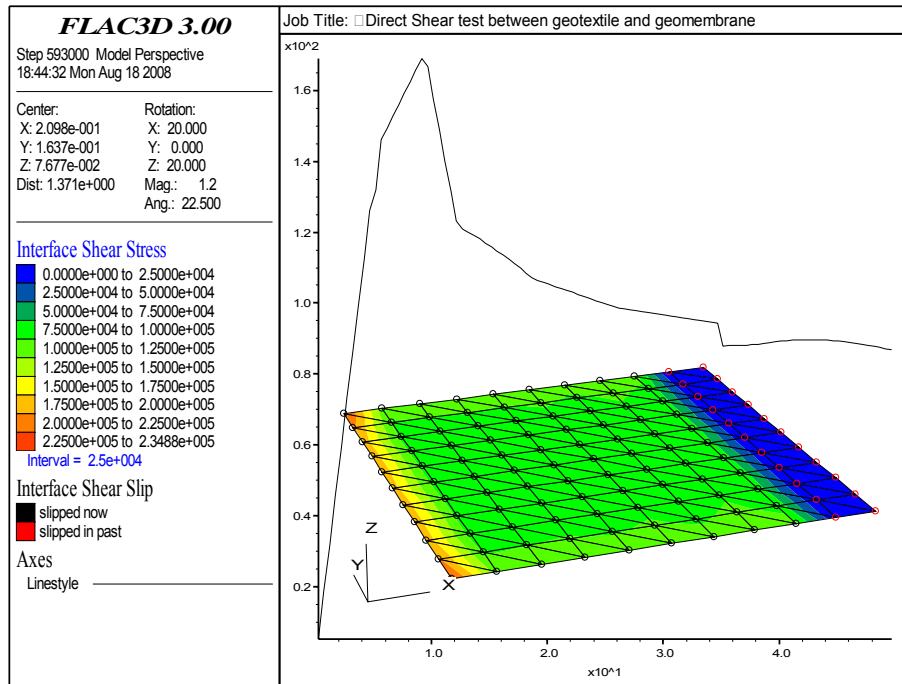


Figure 4.54 Interface shear stress (Pa) from model with uniform settlement

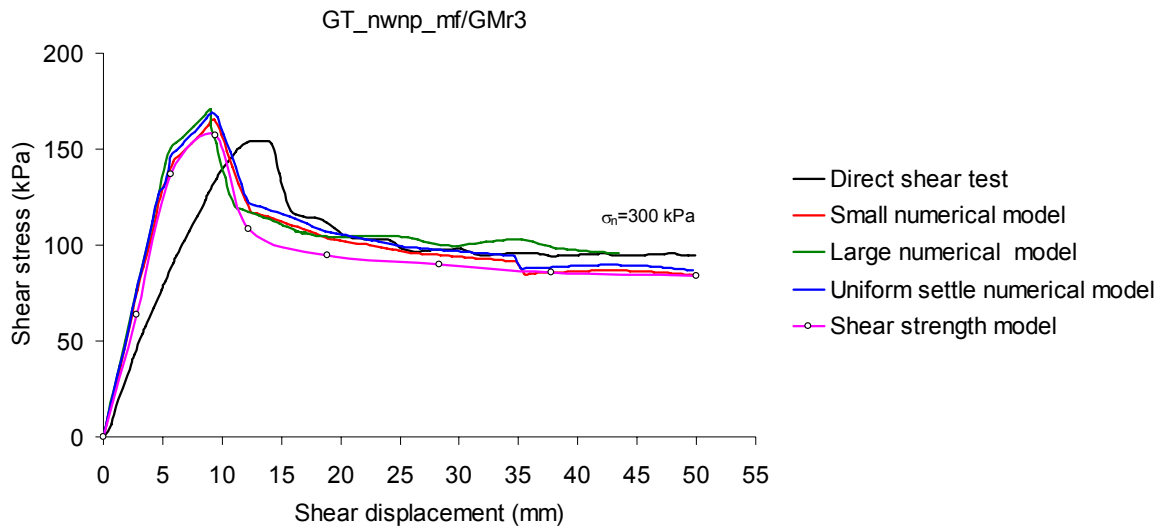


Figure 4.55 Comparison of shear stress-displacement data obtained from numerical models, shear strength model and direct shear test

Conclusiones

De lo tratado a lo largo de esta tesis doctoral, se exponen a continuación las principales conclusiones a las que se ha llegado.

Conclusiones respecto al sistema de soporte diseñado y a la metodología de ensayo:

- La fiabilidad y repetitividad de un ensayo depende de que las condiciones metodológicas se encuentren claramente definidas. En este aspecto, la normativa existente presenta ciertas lagunas, entre las que se incluye lo que se refiere al sistema soporte de los geosintéticos.
- Se ha diseñado un sistema de sujeción de geosintéticos que presentan ventajas respecto a los métodos utilizados en investigaciones previas y a los establecidos en la normativa actual. Este sistema, consistente en una placa metálica dentada se ha demostrado adecuado para la sujeción de geomembranas, de Geosynthetic Clay Liners (GCL), de geotextiles de masa por unidad de área alta o media, y de otros geocompuestos, en los que su espesor y resistencia al punzonamiento es suficiente para que los dientes de la placa no atraviesen, marquen u ondulen el geosintético.
- Se ha establecido una metodología de ensayo que, basada en la norma ASTM D5321-02, plantea un conjunto de actuaciones que complementan lo estipulado en dicha norma. Se considera que ello supone una aportación para conseguir un método universal, adecuado para todo tipo de interfaces entre geosintéticos y entre geosintético y suelo.
- Gracias al sistema de soporte diseñado y a la metodología específica propuesta, se consigue realizar los ensayos en un tiempo razonable y simulando adecuadamente las condiciones de campo.
- En base a la bibliografía consultada, y con la máquina de corte disponible, en la campaña de ensayos realizada se han utilizado muestras de sección cuadrada de 300 mm de lado, al considerarse adecuadas dichas dimensiones para la obtención de las características resistentes al corte de la interfaz entre todo tipo de geosintéticos.
- Finalmente, se hace hincapié en la necesidad de crear una metodología común para realizar ensayos de corte directo de las interfaces geosintético/geosintético y

suelo/geosintético, estableciendo unos requerimientos comunes en cuanto al método y aparato de ensayo, con el fin de asegurar la repetitividad de resultados entre distintos laboratorios, y la validez general de la comprobación y comparación entre diferentes productos.

Conclusiones basadas en la interpretación de los ensayos de corte directo realizados:

- Se han realizado un número de 233 ensayos sobre diversos tipos de interfaz:
 - geomembrana/geotextil
 - geomembrana/geocompuesto drenante
 - geomembrana/suelo
 - geotextil/suelo
 - geomembrana/Geosynthetic Clay Liner (GCL)
 - geocompuesto drenante/GCL
 - suelo/geomalla/geocompuesto drenante
- La imbricación que se produce entre las rugosidades y las fibras o varillas de los geosintéticos influye fuertemente en el comportamiento resistente observado. Este fenómeno que es tanto más acusado cuanto mayor es la tensión normal actuante, unido al deterioro de las imbricaciones al aumentar los desplazamientos, da lugar a curvas tensión-desplazamiento que presentan una resistencia de pico para pequeños desplazamientos y un posterior reblandecimiento (comportamiento strain-softening).
- Los mecanismos de interacción que se desarrollan durante el corte en la mayoría de las interfaces son distintos a bajas y altas tensiones normales. A bajas tensiones normales la imbricación entre los materiales es menor, esto supone que los mecanismos de enganche, enredo, fricción y trabazón se producen a nivel superficial, dando lugar a contactos puntuales. En cambio para altas tensiones normales, debido al aumento de la compresión e imbricación, las interacciones se producen a nivel interno, proporcionando interacciones más globales y continuas. Que se movilice en mayor o menor medida uno u otro mecanismo de interacción depende del tipo de rugosidades, fibras y rigidez de los materiales que constituyen la interfaz.
- Durante el proceso de corte, la deformación volumétrica es de escasa importancia y, en la práctica totalidad de los casos, contractante. En este aspecto, el comportamiento

que presentan las interfaces de geosintéticos sometidas a procesos de corte contrasta con el que muestran los suelos y las discontinuidades rocosas.

- Las condiciones de humedad sólo tienen una influencia importante cuando se estudian interfaces en las que interviene la Geosynthetic Clay Liner (GCL). En el resto de combinaciones geosintético/geosintético y suelo/geosintético, las envolventes de rotura obtenidas en condiciones secas y húmedas son similares.
- Frecuentemente, las envolventes de rotura de las interfaces en la plano $\sigma - \tau$ presentan una forma no lineal. En este caso, si se pretende aplicar el modelo de Coulomb para la obtención de los parámetros resistentes y cálculos de estabilidad, es recomendable su ajuste en el rango de tensiones adecuado al previsible “in situ”.
- La rugosidad de las geomembranas proporciona un sustancial incremento de la resistencia al corte respecto a la que se obtiene con geomembranas lisas, en las interfaces con cualquier tipo de geosintético o suelo. Estos incrementos pueden llegar a alcanzar el 350% y 150% en la resistencia de pico y post-pico, respectivamente.
- El tamaño de la macrotextura de la geomembrana rugosa influye en la resistencia al corte de pico de la interfaz entre geomembrana y otro geosintético. Las geomembranas rugosas con macrotextura mayor de 1 mm proporcionan envolventes de rotura de pico superiores a las de geomembranas rugosas con rugosidades menores de 1 mm. En cambio, el valor de la resistencia al corte post-pico es similar.
- Las interfaces geomembrana rugosa/geotextil no tejido muestran una pérdida de resistencia post-pico del orden de 50-60%. Esta pérdida de resistencia es atribuida principalmente al desgarramiento, arrancamiento, separación, aflojamiento y orientación en la dirección de corte de las fibras del geotextil. Además se produce pulimento y desgaste de la superficie rugosa de las geomembranas, sobre todo a altas tensiones normales.
- El tipo de fibra y método de fabricación del geotextil no tejido influyen en la resistencia al corte de pico de las interfaces geomembrana rugosa/geotextil no tejido. Sin embargo, la resistencia al corte post-pico no muestra una clara dependencia de dichas características del geotextil ni tampoco del tipo de rugosidad de la geomembrana, obteniéndose en todos los casos valores del ángulo de rozamiento post-pico entre 10° y 14°, correspondiendo los mayores valores del rango a los

geotextiles termofundidos, porque el deterioro de las fibras es diferente al que se produce en los geotextiles agujeteados.

- En el caso de la interfaz geomembrana rugosa/geocompuesto drenante, los resultados de resistencia de pico son inferiores a los que se han observado en la interfaz geomembrana/geotextil. Alrededor de un 30% con macrotextura superior a 1 mm y de un 20% en la de menor tamaño de rugosidad. La resistencia post-pico presenta valores similares.
- En las interfaces geomembrana rugosa/suelo se observa que las envolventes de resistencia de pico son similares, aunque la superficie rugosa y método de fabricación sean distintos. En cuanto a la envolvente de resistencia post-pico si se detectan diferencias, siendo mayor en el caso de geomembranas con rugosidad irregular menor de 1 mm, que en el resto.
- En los resultados de los ensayos de corte directo de la interfaz suelo/geotextil influye la granulometría del suelo. A mayor cantidad de gruesos se obtiene mayor resistencia al corte tanto de pico como post-pico, ya que estas partículas se enredan entre las fibras de los geotextiles aumentando el rozamiento. Sin embargo, cuanto mayor es la proporción de gruesos mayor es la pérdida de resistencia post-pico por reblandecimiento.
- En la interfaz geocompuesto drenante/GCL, el espesor y la rigidez de la geored, que forma parte del geocompuesto, afecta al valor de la resistencia al corte en condiciones secas, de tal manera que a mayor espesor y rigidez mayor es la resistencia obtenida, ya que la geored se incrusta más en la GCL.
- Cuando se ensayan GCLs con geomembranas rugosas o geocompuestos drenantes en condiciones húmedas a tensiones normales mayores de 50 kPa o 100 kPa, respectivamente, el plano de corte se produce en el interior de la GCL, en el contacto entre el geotextil tejido de la GCL y la capa de bentonita.
- Los principales mecanismos de interacción resistente que se desarrollan en la interfaz ternaria suelo/geomalla/geocompuesto son el contacto suelo-geocompuesto y la propia resistencia interna del suelo, adquiriendo mayor importancia este último a medida que aumenta el valor de la tensión normal aplicada. Para tensiones normales muy bajas el comportamiento resistente depende, principalmente, de los contactos geomalla-geocompuesto y geomalla-suelo.

- La rigidez y el área de huecos de la geomalla influyen en la resistencia al corte de la interfaz. A mayor rigidez se detectan mayores resistencias para tensiones normales bajas, y a mayor área de huecos se observa mayor resistencia cuando las tensiones normales son altas.
- Los ensayos de corte sobre geosintéticos se han realizado en un rango de tensiones adecuado a las condiciones de campo. Los valores de los parámetros resistentes del modelo de Coulomb son muy variables, pues dependen del tipo de geosintético y del rango de tensiones aplicado. Los puntos representativos de dichos parámetros post-pico, ángulo de rozamiento y adhesión, se localizan en la esquina inferior del diagrama adhesión-ángulo de rozamiento de la Figura C 1, estando limitada, prácticamente en su totalidad, por una recta de pendiente negativa que corta a los ejes en $\phi = 30^\circ$ y $c_a = 40$ kPa
- La mayoría de las envolventes obtenidas de los ensayos realizados arrojan valores bajos de la adhesión, inferiores a 6 kPa, lo que indica un comportamiento eminentemente friccional de las interfaces entre geosintéticos.
- Sin embargo, algunas de ellas aportan valores superiores de la adhesión, correspondiendo a ensayos realizados en condiciones secas, de interfaces con geomembranas con rugosidad mayor de 1 mm, suelo o ambos materiales a la vez.

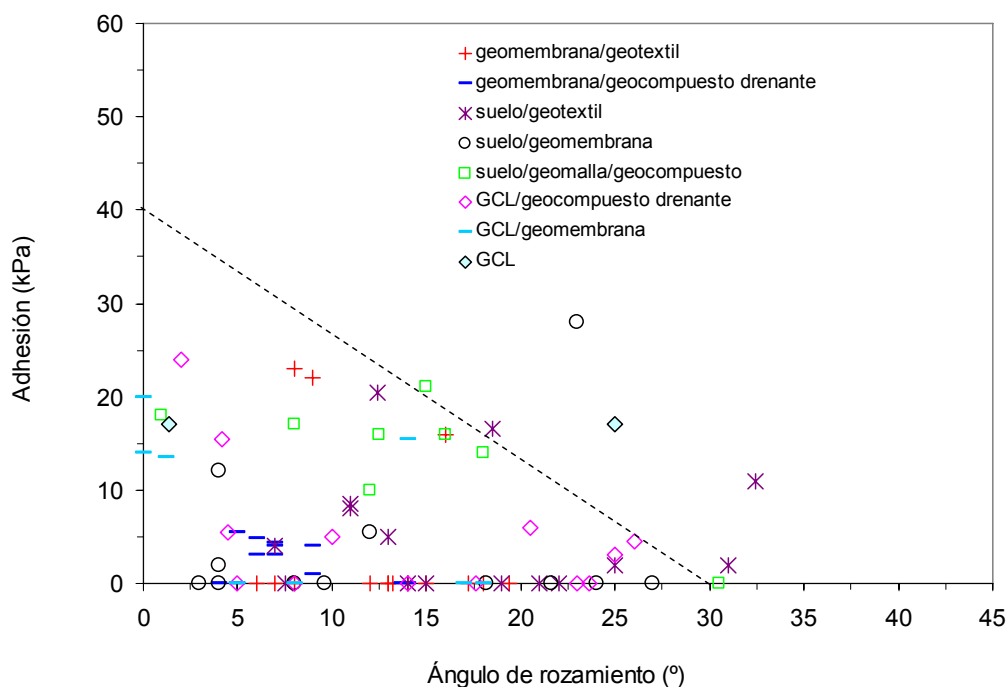


Figura C 1 Parámetros resistentes de diferentes interfaces

- En el gráfico de la Figura C 2 se representan los resultados de los parámetros resistentes de las interfaces entre geosintéticos y entre suelo y geosintético, obtenidos en la presente investigación junto con otros resultados aportados por diferentes autores y recogidos en la bibliografía consultada. Todos ellos se comparan con el rango establecido por Sánchez-Alciturri et al. (1993) para el ángulo de rozamiento y cohesión de la masa de residuos para el diseño de vertederos. La resistencia al corte de las interfaces presenta, en su práctica totalidad, valores inferiores a los planteados para la masa de residuos. Esto indica la necesidad, en los análisis de estabilidad, de establecer modos alternativos de posible deslizamiento, bien global a través de la masa de residuos, involucrando en su caso al cemento y localmente las capas de impermeabilización, o bien a lo largo de las superficies definidas por las capas de impermeabilización de la base o sellado de vertederos.

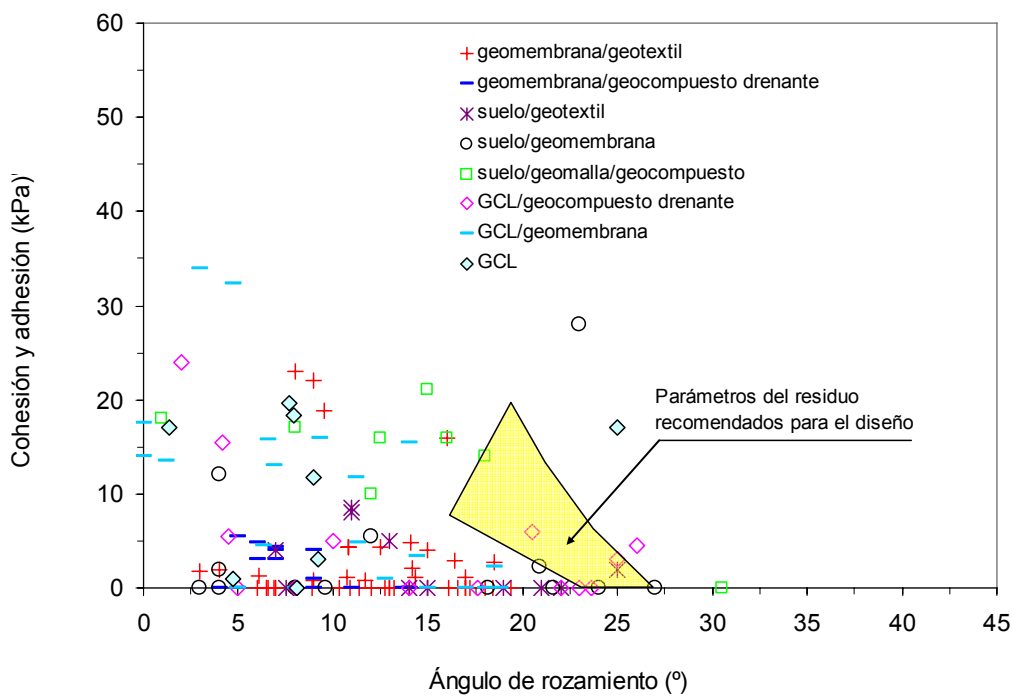


Figura C 2 Parámetros resistentes del residuo e interfaces con geosintéticos

Conclusiones respecto del modelo desarrollado para el análisis del comportamiento resistente de la interfaz geomembrana rugosa/geotextil no tejido:

- Las interfaces entre geosintéticos presentan a menudo envolventes de rotura no lineales. El ajuste mediante el modelo de Coulomb se ve, por tanto, restringido al rango de tensiones normales establecido, no pudiéndose extrapolar los parámetros a otro intervalo. Por esa razón interesa implementar modelos de comportamiento que mejorar el ajuste a la respuesta real que presentan las interfaces. En este aspecto, se ha desarrollado una expresión empírica de la resistencia al corte de pico para el contacto entre geomembrana rugosa y geotextil no tejido que contempla la variabilidad de la rugosidad de la geomembrana, así como la compresibilidad variable del geotextil.
- Debido a las diversas similitudes que presenta el comportamiento al corte en las interfaces de los geosintéticos respecto al que corresponde a las juntas de roca, la expresión del modelo planteado tiene una estructura similar al modelo de Barton (1973), siendo su expresión:

$$\tau/\sigma_n = \tan \left[HL \cdot I \cdot \log \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right) + \phi_{residual} \right]$$

- La relación entre tensión normal y tangencial de pico es puramente friccional. El ángulo de rozamiento de pico es la suma del ángulo de rozamiento residual y de un término que depende del valor de la tensión normal aplicada y de tres parámetros: Hook an Loop (*HL*), Interbedding (*I*) y Geotextile Compression Stress (*GCS*).
- El coeficiente hook and loop (*HL*) representa el enganche de las fibras del geotextil (formar nudos, loop) en las rugosidades de la geomembrana (ganchos, hook). Los valores de hook and loop se ha encontrado que varían aproximadamente entre 2 y 4 para geomembranas con macrotectura menor a 1 mm, y entre 4 y 8 para macrotecturas mayores de 1 mm.
- La tensión a compresión del geotextil (*GCS*) es una tensión de referencia igual al valor de la tensión normal que, aplicada sobre el geotextil, consigue una deformación normal de 0.8. Se ha comprobado experimentalmente que el valor de dicha tensión de referencia coincide aproximadamente con el doble del valor de la máxima tensión a tracción del geotextil en la dirección de fabricación ($GCS \approx 2 \cdot T_{MD}$)

- El coeficiente interbedding (I) representa la penetración de las rugosidades de la geomembrana en la matriz del geotextil. Dicho coeficiente depende de la relación GCS/σ_n , es decir, de cuanto esté comprimido el geotextil. El valor I varía aproximadamente entre 1 y 3 para el rango de tensiones normales de 25 a 800 kPa.
- Se ha demostrado que el modelo presenta un buen ajuste con los resultados de los ensayos de corte directo. Los datos y resultados de los ensayos de corte directo, tensión normal (σ_n), tensión tangencial de pico (τ_p), desplazamiento horizontal de pico (δ_p), y ángulo de rozamiento residual (ϕ_r), son necesarios para ajustar los parámetros hook and loop (HL) e interbedding (I).
- Este modelo se ha implementado en un programa numérico de diferencias finitas en tres dimensiones, FLAC^{3D}, simulando el ensayo de corte directo entre una geomembrana y un geotextil, y obteniendo la curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal correspondiente a las tensión normal aplicada. De esta forma se ha podido considerar la influencia de los efectos de borde, con distribución tensional no uniforme en la interfaz analizada.
- Los resultados experimentales coinciden excelentemente con los que se deducen del análisis numérico para tensiones normales inferiores a 450 kPa. La imposibilidad de ejecutar ensayos con valores superiores a esta tensión normal no ha permitido establecer la bondad de este modelo por encima de este rango.
- El fin último de la implementación del modelo en el método numérico empleado, es su uso para el cálculo de estabilidad y desplazamientos en la interfaz geotextil/geomembrana del sistema de impermeabilización de vertederos.

Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación que se proponen se refieren, por un lado, a la mejora del diseño de la caja de corte para la ejecución de ensayos de la interfaz entre geosintéticos. Por otro lado, a la ejecución e interpretación de ensayos de corte sobre diversas interfaces. Por último, al desarrollo del modelo de comportamiento, actualmente establecido para la interfaz geomembrana/geotextil, para que pueda ser extrapolado al resto de interfaces que contengan geosintéticos, aplicable al cálculo de estabilidad y diseño de vertederos y otras estructuras como rellenos con suelo reforzado.

Diseño de la caja de corte

- Modificar la caja de corte para reducir los efectos de borde, manteniendo igual área de contacto a lo largo de todo el ensayo, y consiguiendo un mayor valor del desplazamiento horizontal.
- Variar el tamaño de la sección de la caja para valorar en que medida afecta a la resistencia de corte.
- Una de las alternativas barajadas de diseño de una nueva caja de corte es la que se presenta a continuación:

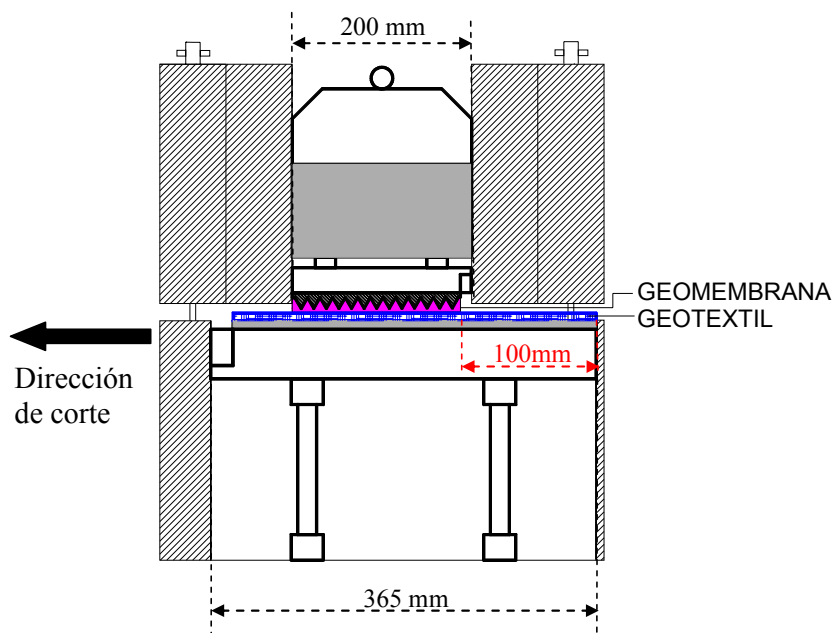


Figura T1 Esquema de una futura caja de corte

Ejecución e interpretación de ensayos

- Complementar el estudio realizado en la presente investigación con la realización de mayor número de ensayos en interfaces con diversos tipos de geosintéticos.
- Realizar ensayos a tensiones normales superiores a 500 kPa
- Realizar ensayos con diferentes geosintéticos utilizados en el refuerzo de suelos (geomalla, geotextil, etc.) variando la densidad de compactación y tipo de suelo, con el fin de llegar a la combinación óptima en cuanto a la granulometría, masa por unidad de área del geosintético, abertura y rigidez de malla, etc., así como cuantificar los parámetros resistentes para el diseño de suelos reforzados y paquetes de firme.

Modelo de comportamiento resistente al deslizamiento

- Ajustar el modelo desarrollado a otros tipos de interfaz como geotextil/suelo, suelo/geomalla/suelo, GCL/geomembrana, suelo/geomembrana, de uso extendido en diferentes obras como carreteras, vertederos, taludes, etc.
- Contrastar los resultados de los ensayos y del método numérico utilizado (FLAC^{3D}) con métodos de elementos finitos, a escala macromecánica.
- Estudiar mediante métodos numéricos la estabilidad de vertederos con la aplicación del modelo desarrollado y comparar con el criterio de Mohr Coulomb.
- Estudiar el comportamiento de las interfaces a nivel micromecánico, es decir, a nivel de fibras y rugosidades individuales. Para su desarrollo pueden utilizarse programas que simulen la respuesta de un medio discontinuo o utilicen elementos discretos como UDEC (Universal Distinct Element Code) o PFC (Particle Flow Code), respectivamente.

Conclusions

A summary of the main conclusions from this doctoral thesis are presented below.

The conclusions are reached based on both the design of the gripping surface and the specific methodology to carry out testing:

- The existing direct shear standard contains some gaps like the definition of the specific geosynthetic support.
- The invented steel textured plate attaches the Geosynthetic Clay Liner (GCL), the geomembrane, geotextiles with high mass per unit area and geocomposites firmly.
- The specific methodology, based on ASTM D5321-02 standard, contributes in creating a universal method to carry out tests between geosynthetics and soil and geosynthetic.
- Thanks to the design support system and specific methodology adequate time spent on testing and suitable field conditions is possible.
- The size of samples 300 mm x 300 mm is correct to represent the majority of the geosynthetics.
- Finally, in the geosynthetic world there is a great necessity to create a communal methodology, using the same devices and machines, to carry out direct shear tests geosynthetic/geosynthetic and soil/geosynthetic to check results between different labs and to compare different geosynthetics materials.

The conclusions are based on the data and interpretations of the large direct shear tests presented in this investigation:

- 233 tests of different interfaces were carried out:
 - geomembrane/geotextile
 - geomembrane/drainage geocomposite
 - geomembrane/soil
 - geotextile/soil
 - geomembrane/Geosynthetic Clay Liner (GCL)
 - drainage geocomposite/GCL
 - soil/geogrid/drainage geocomposite

- The interlocking between roughness and fibers of the geosynthetics influence greatly the strength behaviour of the interfaces. This fact is more important at high normal stress, which together with the damage on the asperities and fibers during the test, causes strain-softening shear behaviour.
- Normally, the interaction mechanisms between geosynthetics are different at low and high normal stress. At low normal stress the interlocking and friction are smaller on a superficial level with specific contacts. However, at high normal stress the geosynthetics becomes compressed and increasingly interlocked and friction. This results in more global and continuous interactions.
- More commonly, the volumetric deformation is insignificant during the direct shear test and the majority of tests show contracted dilatancy.
- The test conditions, wet or dry, influence the Geosynthetic Clay Liner/geosynthetic interface. However, the rest of geosynthetic/geosynthetic and soil/geosynthetic interface failure envelopes are similar in both conditions.
- Frequently, the geosynthetic/geosynthetic interfaces failure envelopes can be nonlinear. In this case, it is advisable to use the frictional parameters from Coulomb model only within applied normal stress range.
- The increase of the interface shear strength is greater with the texture geomembrane than the smooth geomembrane. These peak and post-peak increments could reach 350% and 150%, respectively.
- The macrotecture size of geomembranes influences the peak geomembrane/geosynthetic interfaces shear strength. Macrotecture > 1 mm obtains greater peak failure envelopes than macrotecture < 1 mm. However, both sizes show similar post-peak strength.
- Texture geomembrane/nonwoven geotextile interfaces show post-peak strength loss of 50-60%. It is attributed to pulling out, tearing, separation, loosening and the direction of the fibers from the geotextile. Moreover, at high normal stresses, the polishing and damage of the geomembrane texturing also contributes to the loss of strength.
- Fiber type and fabric style of nonwoven geotextile can influence the peak textured geomembrane/nonwoven geotextile interface shear resistance. However, post-peak

shear resistance appears to be independent of geotextile fiber type, fabric style and geomembrane roughness type. Therefore, post-peak frictional angle is within range 10° - 14° for all tested interfaces. The heat-bonded geotextiles appear to yield higher residual interface shear strength than needle-punched geotextiles.

- The peak shear strength from texture geomembrane/drainage geocomposite interface is less than texture geomembrane/geotextile interface. Around 30% with macrotecture > 1 mm and 20% with less texture. However, post-peak shear strength is similar.
- The post-peak soil/textured geomembrane interface shear strength is affected by the size and shape of the roughness. The geomembranes with irregular roughness and asperities height less than 1 mm present higher failure envelopes. However the peak resistance is similar.
- The soil/nonwoven geotextile interface shear resistance is influenced by the amount of coarse soil. Therefore, the higher the coarse amount the higher the shear resistance, because the engagement of the soil particles between geotextile fibers increases the friction. However, the higher coarse amount the higher post-peak resistance loss.
- The GCL/drainage geocomposite interface shear strength, tested in dry conditions, is influenced by the thickness and the stiffness of the geonet. Therefore, the higher the thickness and stiffness, the higher shear resistance, as the geonet is embedded in the GCL.
- The GCL/textured geomembrane interface tested at normal stress higher than 50 kPa and GCL/drainage geocomposite higher than 100 kPa, with wet test conditions, means that the slide plane occurs inside the GCL, between the woven geotextile and bentonite layer.
- The main interaction mechanisms from the soil/geogrid/geocomposite interface are soil-geocomposite contact and internal soil friction. The higher the normal stress the higher the internal soil friction. However, at very low normal stress the geogrid-geocomposite and geogrid-soil contact can develop.
- The shear strength from soil/geogrid/geocomposite interface depends on the stiffness and hollow area of the geogrid. At low normal stress, the higher the stiffness the

higher the shear strength. At high normal stress, the higher the hollow area the higher the shear strength.

- Figure C 1 shows the post-peak friction parameters, adhesion versus friction angle, from different tested interfaces of this investigation. It can be seen that the majority of points are below the defined line by (40, 0) and (0, 30).
- The majority envelopes give low adhesion values, less than 6 kPa. In this case, the shear behaviour is mainly frictional.
- The points with relative high adhesion values are from interfaces with macrotexture geomembranes higher than 1 mm, soil or both materials and tested in dry conditions.

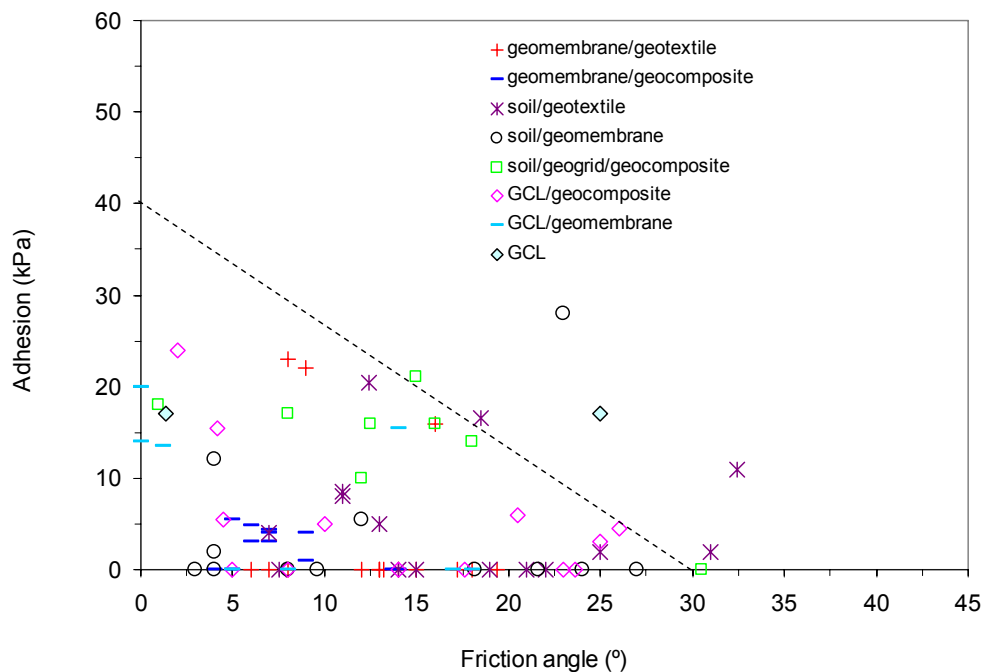


Figure C 1 Frictional parameters from diferent tested interfaces

- Figure C 2 shows frictional parameters of tested interfaces from this investigation and other named authors. Futhermore, the waste frictional parameters range from Sánchez-Alciturri et al. (1993). It can be seen that usually frictional parameters from interfaces are below waste parameters. This means, the failure of the landfill could be through waste, foundation and waterproof system or the slide of the waterproof layers of the base and cover systems.

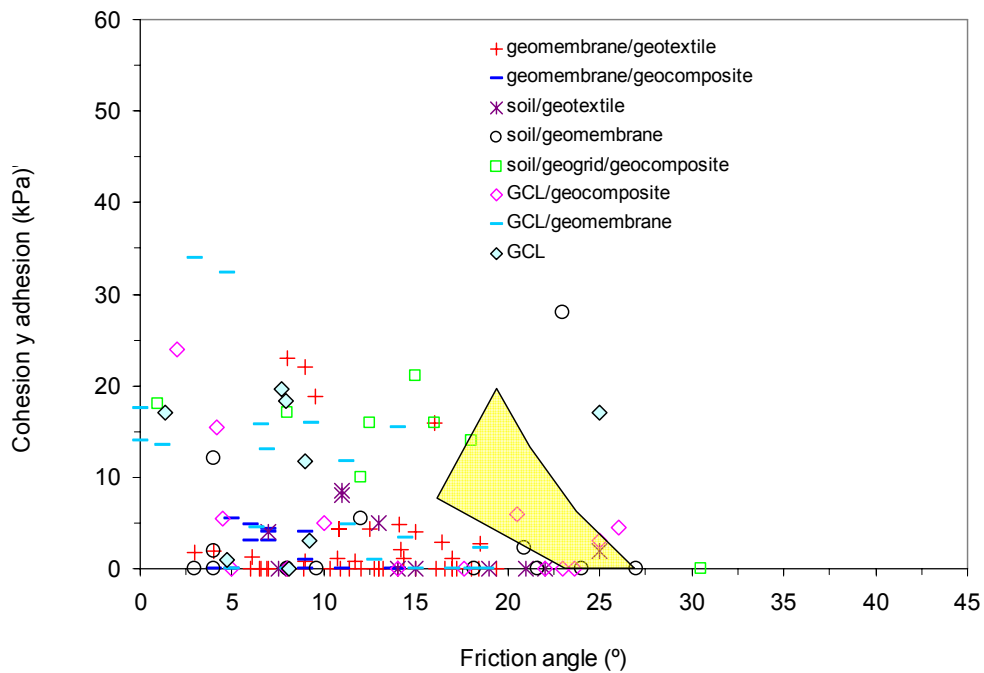


Figure C 2 Frictional parameters of the waste and interfaces with geosynthetics

Conclusions are based on developed shear strength model for the texture geomembrane/non woven geotextile interface:

- Texture geomembrane/nonwoven geotextile interface failure envelopes can be nonlinear. The use of an adhesion intercept at low or zero normal stress would then be inadmissible.
- Chapter 4 develops the empirical shear stress equation to model the real shear behaviour of the geosynthetics interface. This expression is sensitive both to variable geomembrane roughness and to variable compressibility of the geotextile.
- Several shear behaviour resemblances exist between rock joint and geosynthetics interfaces. In this way, the empirical non-linear peak shear equation is similar shown by Barton (1973) and it is found in the following:

$$\tau/\sigma_n = \tan \left[HL \cdot I \cdot \log \left(\frac{GCS}{\sigma_n} \right) + \phi_{residual} \right]$$

- The hook and loop coefficient (HL) represents the engagement of the geotextile fibers (“loop” structure) by geomembrane roughness (“hook” material). Hook and loop values vary from approximately 2 to 4 for geomembrane macrotecture smaller than 1 mm, and 4 to 8 for macrotecture bigger than 1 mm.

- The geotextile compressive stress (GCS) is equal to the normal stress on the geotextile which achieves an approximated normal deformation of 0.8 of this material. It can be considered $GCS \approx 2 \cdot T_{MD}$, where T_{MD} is the maximum tensile strength in the machine direction for geotextile.
- The interbedding coefficient (I) between the macrotextural features of geomembrane and geotextile depends on the ratio GCS/σ_n . Interbedding value varies from approximately 1 to 3 from 25 to 800 kPa of normal stress.
- This model to estimate shear strength interfaces is reliable. Shear test data will need to be analysed and reported with the new parameters in mind. The following data is required from direct shear tests on texture geomembrane/nonwoven geotextile interfaces: normal stress (σ_n), peak shear strength (τ_p), peak shear displacement (δ_p), geotextile compression reference stress (GCS), and residual friction angle (ϕ_r)
- A numerical model by a differential finite element program has been developed, FLAC^{3D}, where the above empirical expression has been introduced. This model simulates the shear direct test and shows shear stress versus shear displacement curve at applied normal stress. In this way, it is possible to assess the influence of edge effects and non uniform stress distribution on the interface.
- Direct shear model and direct shear test coincide well. The shear strength model can be used both to adjust experimental data and to predict it. However, precaution is needed when predicting shear strength for high normal stress ($\sigma_n > 450$ kPa), due to the lack of experiments for this range of stress.
- The main aim of the developed model is to calculate stability and displacement of the geomembrane/geotextile interface belonging to a landfill waterproof system.

Future research

Proposed future research:

- To improve the shear box to carry out geosynthetic/geosynthetic interface testing.
- To carry out more tests with different geosynthetics.
- To research the developed shear strength model from texture geomembrane/nonwoven geotextile interface, for the rest geosynthetic/geosynthetic and soil/geosynthetic interfaces, and use this model to introduce stability analysis and design of the landfills.

Shear box design

- To modify the shear box to reduce edge effect, to keep constant contact area, and to obtain higher horizontal displacement.
- To vary box section size and to assess as sample size affects in the shear stress results.
- Figure T 1 shows one new possible shear box design:

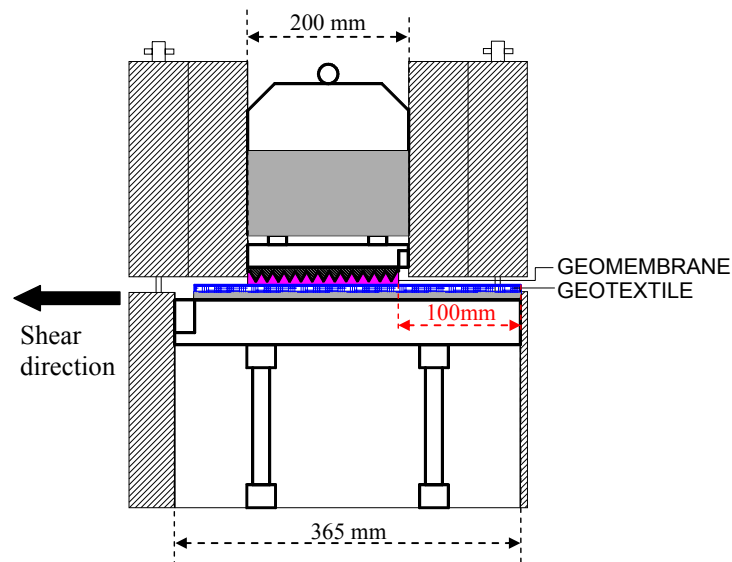


Figure T 1 Sketch of a future shear box

Carry out test

- To carry out more tests with different geosynthetics to support the conclusions from this investigation.
- To carry out tests at normal stress higher than 500 kPa.
- To carry out tests with different geogrids and geotextiles used with reinforced soils, varying coarse amount, compacted density, type of soil, etc. Therefore obtaining the optimum combination of soil, geogrid and conditions to get the friction parameters to design.

Shear strength model

- To adjust the developed model for other types of interfaces: soil/geotextile, soil/geogrid/soil, GCL/geomembrane, soil/geomembrane, as it can be used for landfills, roads, slopes, etc.
- To compare test results and numerical model with element finite methods for macromechanical levels.
- To study landfill stability with developed numerical model and to compare with Mohr Coulomb criterion.
- To develop textured geomembrane/nonwoven geotextile interface shear strength model for micromechanical level, at the level of the fibres and individual spikes of the geosynthetic. For this investigation it is possible to use the programmes: UDEC and PFC. UDEC (Universal Distinct Element Code) simulating the response of discontinues media. PFC (Particle Flow Code) is distinct element modelling for micromechanical analysis of geomaterials and particulate systems.

Referencias

- ASTM, Standard D5321-02: "Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. Annual book of ASTM standards (2004), Vol. 04.13, West Conshohocken, Pa., 122-128.
- ASTM, Standard D 6693, 2004. Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes.
- Norma UNE EN ISO 12957-1, 2005: Geosintéticos. Determinación de las características de fricción. Parte 1: Ensayo de cizallamiento directo.
- Norma UNE EN ISO 12957-2, 2005: Geosintéticos. Determinación de las características de fricción. Parte 2: Ensayo de plano inclinado.
- Norma UNE 103-500-94: Ensayo de compactación. Proctor normal.
- Norma UNE 103-501-94: Ensayo de compactación. Proctor modificado.
- EN ISO, Standard 9863-1, 2005. Geosynthetics. Determination of thickness at specified pressures. Part 1: Single layers.
- EN ISO, Standard 10319, 2008. Geosynthetics. Wide-width tensile test.
- EN ISO, Standard 527, 1997. Plastics. Determination of tensile properties.
- Itasca Consulting Group, Inc. 2007. FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Ver. 3.1, User's Manual. Minneapolis: Itasca.
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de Abril de 1999, relativa al vertido de residuos DOCE 182/L, de 16-07-99.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Ministerio de Medio Ambiente. Fecha de publicación en el BOE: 29/01/2002.
- Plan Nacional de Residuos Urbanos (2000-2006). Ministerio de Medio Ambiente
- Borrador del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR). Octubre 2008
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Quality and Pollution. (<http://www.mma.es>)
- European commission. Environment and energy (<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>)
- Amadei B., Wibowo J., Sture S., Price R. H., 1998. Applicability of existing models to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions. Geotech. Geo. Eng.;16, 79-128
- Bandis, S., Lumsden, A. C., Barton, N., 1983. Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 20, 249-268.
- Barco Herrera J. A., Estabilidad de taludes en vertederos controlados. Resistencia y deformabilidad. Trabajo de investigación. Universidad de Cantabria.
- Barton, N., 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engineering Geology. Elsevier, 7, 287-332.

- Barton, N., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10, 1-54.
- Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K., 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of Rock Joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No 3, 121-140.
- Celemín M., 1987. Comportamiento del contacto entre bloques rígidos análisis experimental. Tesis Doctoral, E. T. S. de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
- Collazos Héctor, D. M., 1998. Deslizamiento de basura en el relleno sanitario Doña Juana. Santa Fe de Bogotá. Enero 1998. CEPIS.
- Eid, H.T., Stark, T. D., Doerfler C. K., 1999. Effect of shear displacement rate on internal shear strength of a reinforced geosynthetic clay liner. *Geosynthetic International*, Vol. 6, No 3, 219-239.
- Espinace Abarzúa, R., 2000. La geotecnia ambiental aplicada a los vertederos sanitarios. Curso 10.7 de Medio Ambiente de Suances. Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: una perspectiva internacional. Universidad de Cantabria.
- Fox, P. J., Rowland, M. G., and Scheithe, J. R., Davis, K. L., Supple, M. R., and Crow, C. C., 1997. Design and evaluation of a large direct shear machine for geosynthetic clay liners. *Geotech. Testing Journal*, 20(3), 279-288.
- Fox, P. J., Rowland, M. G, Scheithe, J. R., 1998. Internal Shear Strength of Three Geosynthetic Clay Liners. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, 124(10), 933-944.
- Gilbert, R. B., Fernandez, F., Horsfield, D. W., 1996. Shear strength of a reinforced geosynthetic clay liner. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 122, No 4, pp. 259-266.
- Gilbert, R. B., Scranton, H. B., Daniel, D. E., 1997. Shear strength testing for geosynthetic clay liners. Testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners, ASTM STP 1308, L. W. Well. ed., ASTM, Pa., 121-138.
- Giroud, J. P., Swan, R. H., Richer, P. J., Spooner P. R., 1990. Geosynthetic landfill cap: Laboratory and field tests, design and construction. *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Hoedt (ed.) Balkema, Rotterdam. ISBN 9061911192.
- Giroud, J. P., Darrasse, J., 1993. Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interface shear strength. *Geotextiles and Geomembranes* 12, 275-286.
- Giroud, J. P., 2003. Quantitative analysis of the impact of adhesion between geomembranes and geotextiles on the stability of soil-geosynthetic systems on slopes. JP Giroud, Inc., Ocean Ridge, FL, USA, pp. 14.
- Goodman, R. E., 1974. The mechanical properties of joints. *Proc. 3rd Congr. ISRM*, Denver, Vol. 1A, pp. 127-140
- Goodman, R. E., 1976. *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rock*, p. 472. West, New York.
- Grasselli, G., Egger, P., 2003. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;40, 25-40

- Gruber, J., 2008. Geosynthetic reinforcement retaining structures in Alpine regions. EuroGeo4. Proc. 4th European Geosynthetic Conference.
- Güler, E., Avci, C. B., 1995. Evaluation of the incident at the Ümraniye landfill, Istanbul. And proposed remedial investigations. Waste Disposal by Landfill. Green'93, Sarsby ed., pp 637-642. Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 3566
- Hebeler, G. L., Frost, J. D., Myers, A. T., 2005. Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane-geotextile systems. Geotextiles and Geomembranes 23, 77-105.
- Hungr, O., Coates, D. F., 1978. Deformability of rock joints and its relation to rock foundation settlements. Can. Geotech. J. 15, 239-249.
- Izgin, M., Wasti, Y., 1998. Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. Geotextiles and Geomembranes 16(4), 207-219.
- Jessberger, H. L., 1990. Stoffeigenschaften von Abfall im Hinblick auf Standsicherheitsuntersuchungen an Abfalldeponien. Neuzzeitliche Deponietechnik. H. L. Jessberger ed. Bochum. 171-193.
- Jessberger, H. L., Kockel, R., 1993. Determination and assessment of the mechanical properties of waste. Proc. Green'93 Waste disposal by landfill, pp 313-322. Sarsby ed., Balkema, Rotterdam 1995. ISBN 9054103566.
- Kavazanjian E., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G. R., 1994. Evaluation of MSW properties for seismic analysis. Extended manuscript of a paper submitted for the publication at the ASCE Geoenvironmental 2000 SPC. Feb 1995, pp 1-16. New Orleans. Louisiana.
- Koerner, R. M., 1998. Designing with geosynthetics, fourth ed. Prentice-Hall, New Jersey, USA. ISBN 0137261756.
- Koutsourais, M. M., Sprague, C. J., 1991. Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design. Geotextiles and Geomembranes 10, 531-548.
- Kulhaway, F. H., 1975. Stress-deformation properties of rock and rock discontinuities. Engng Geol. 8, 327-350.
- Ladanyi, B., Archambault, G., 1970. Simulation of the shear behaviour of a Joint rock mass. In Proc. 11th US Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, p. 105-125
- M. Bacas, A. B., Cañizal, J., Da Costa, A., Sagaseta, C., Martínez A., Fernández M., 2008. Study of frictional behaviour of geosynthetics used for municipal solid waste landfills. Proc. 4th European Geosynthetic Conference.
- Martínez Santamaría, J. M., 2004. Aplicación de los geosintéticos en vertederos. V cursos de verano de la Universidad de Cantabria. Curso SA.2.6. Aplicación de los geosintéticos en obras de construcción y edificación (2^a edición).
- Mitchell, J. K., Seed, R. B., Seed, H. B., 1990. Stability Considerations in the Design and Construction of Lined Waste Depositories. Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvil Landva, G. David Knowles, Eds.
- Mitchell, R. A., Mitchell, J. K., 1992. Stability Evaluation of waste landfills. Proc. ASCE Specialty Conference on Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, University of California, Berkeley, June 29-July 1.

- Newland, P. L., Allely, B. H., 1957. Volume changes in drained triaxial tests on granular materials. *Geotechnique* 7, 17-34.
- Nye, C. J., Fox, P. J., 2007. Dynamic shear behaviour of a needle-punched geosynthetic clay liner. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, 133(8), 973-983.
- Oweiss, I. S., Khera, K., 1990. *Geotechnology of waste management*. Butterworths. London.
- Palma, J. H., 1995. Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Pasqualini, E., Fratolocchi, E., Stella, M., 2002. Stability of liners: some particular issues. Proc. of the fourth international congress on environmental geotechnics (4th ICEG)/Rio de Janeiro/Brazil.
- Patton, F. D., 1966. Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, 1: 509-513
- Plesha, M. E., 1987. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*;11, 345-362
- Russell, D., Jones, V., Neil Dixon, 1998. Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembrane* 16, 45-71.
- Sánchez-Alciturri, J.M. 1980. Influencia de la historia tensional en el comportamiento sin drenaje de arcillas blandas saturadas. Análisis experimental. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Sánchez-Alciturri, J. M., Palma, J., Sagaseta, C., Cañizal, J., 1993. Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill. *Waste Disposal by landfill. Green'93*, Sarsby ed., pp 357-363. Balkema, Rotterdam, ISBN 9054103566.
- Sharma, J. S., Fleming, I. R., Jogi, M. B., 2007. Measurement of unsaturated soil-geomembrane interface shear-strength parameters. *Canadian Geotechnical Journal* 44, pp 78-88.
- Shehata, W. M., 1972. Proc. Symp. On Percolation Through Fissured Rock, paper No. T1-F, Stuttgart.
- Singh, S., Murphy, B., 1990. Evaluation of the stability of sanitary landfills. *Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice*. A. Landva and G. D. Knowles, eds., ASTM, STP 1070, pp 240-258.
- Stark, T. D., Poeppel, A. R., 1994. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(3), 597-615.
- Stark, T. D., Williamson, T. A., Eid, H. T., 1996. HDPE geomembrane/geotextile interface shear strength. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(3), 197-203.
- Stark, T. D., Eid, H. T., Evans, W. D., Sherry, P. E., 2000. Municipal solid waste slope failure I y II. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg*, 408-419.
- Triplett, E. J., Fox, P. J., 2001. Shear strength of HDPE geomembrane/geosynthetic clay liner interfaces. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, 127(6), 543-552.
- Van Impe, W. F., 1998. ITC 5 Activities. State of the Art. Proc. III Int. Congress on Environmental Geotechnics. Lisbon.

-
- Wasti Yildiz, Özdüzgün Z. Bahadır, 2001. Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box test. *Geotextiles and Geomembranes* 19, 45-57.
- Zornberg, J. G., McCartney, J. S., Swan, R. H., 2005. Análisis of a large database of GCL internal shear strength results. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE*, 131(3), 367 – 380.

Apéndices

Apéndice A

Metodología y máquina de corte directo

1 Metodología desarrollada del ensayo de corte directo

El método de ensayo de corte directo se basa en las pautas marcadas por la norma ASTM D5321-02. Parte de este texto es una traducción de dicha norma, complementado con nuevas aportaciones deducidas de la investigación llevada a cabo. Las nuevas aportaciones están escritas en letra cursiva.

1.1 Terminología

Desplazamiento horizontal, δ , desplazamiento relativo de un material respecto a otro durante el proceso de corte, en mm.

Fuerza normal, F_n , fuerza vertical constante sobre la muestra, en kN

Fuerza tangencial, F_h , fuerza horizontal durante el proceso de corte, el cual se realiza a velocidad de desplazamiento constante, en kN

Tensión normal, σ , fuerza normal sobre la superficie de contacto de la muestra, en kPa

Tensión tangencial, τ , fuerza tangencial en la superficie de contacto de la muestra, kPa

Tensión tangencial de pico, τ_p , *tensión tangencial máxima durante el ensayo de corte directo, kPa*

Tensión tangencial post pico, τ_{pp} , *tensión tangencial correspondiente a un desplazamiento horizontal determinado por el usuario, y mayor que el desplazamiento correspondiente a la tensión tangencial de pico, en kPa*

Adhesión, c_a , *se determina como la intersección con el eje-y de la recta de regresión, de los puntos representativos en el diagrama de Mohr, correspondientes al valor de resistencia al corte de pico o post pico entre dos materiales, para la tensión normal aplicada a la superficie de contacto de ambos materiales, en kPa. Si su valor es positivo puede asumirse que representa la resistencia al corte entre dos materiales adyacentes bajo una tensión normal de cero. Cuando el valor de la adhesión resulte negativo, representa únicamente, el valor de la intersección en el eje-y de la recta de regresión.*

Coefficiente de rozamiento, ω , es la pendiente de la recta de regresión, que relaciona el valor de la tensión tangencial de pico o la tensión tangencial post pico, que resiste el deslizamiento que se produce entre dos materiales, y la tensión normal aplicada sobre la superficie de contacto de ambos cuerpos.

Ángulo de rozamiento, ϕ , ángulo de rozamiento entre dos materiales, definido como la inclinación de la recta de regresión dada por la tensión tangencial máxima frente a la tensión normal correspondiente o por la tensión tangencial post pico frente a la tensión normal correspondiente en grados sexagesimales.

Condiciones ambientales normales, mantener el ambiente con una humedad relativa de $65 \pm 5 \%$ y una temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$.

Geosintéticos, G, material de deformabilidad apreciable, fabricado de materiales sintéticos. Proporcionan mejora en el terreno para obras de ingeniería.

Geosynthetic clay liners, GCL, material geosintético compuesto de bentonita y otros geosintéticos, normalmente geotextiles y geomembranas.

1.2 Aparatos

Aparato de corte—aparato rígido para mantener fijamente la muestra y de forma que la fuerza de corte pueda ser aplicada a dicha muestra sin momento torsor. La máquina contiene una *caja de corte*, que está dividida horizontalmente en dos mitades una fija (superior) y una móvil (inferior), ambas partes son lo suficientemente rígidas para no deformarse durante el corte de la muestra (Nota 1). La caja de corte se sitúa en el interior de un *carro deslizante*, en el cual la parte inferior de la caja queda rígidamente bloqueada. El carro va colocado sobre unos cojinetes de baja fricción que permiten el movimiento en dirección longitudinal. El carro deslizante permite sumergir la muestra en cualquier solución líquida (agua, lixiviado, etc.) durante el ensayo.

La caja de corte es de sección cuadrada de lado, $l = 300 \text{ mm}$. Por tanto según la norma ASTM D 5321-02 el tamaño máximo de grano de suelo utilizado, d_{85} , debe ser ($l = 15 * d_{85}$) 20 mm y el tamaño máximo de abertura de malla, w , (en el plano horizontal) del geosintético ensayado ($l = 5 * w$) 60 mm . La altura de cada mitad de la caja de corte es de 10 mm .

Sistema de aplicación de la carga vertical, tiene la capacidad de aplicar y mantener una tensión normal uniforme y constante sobre la muestra durante la ejecución del ensayo. La muestra se consolida por medio de un sistema hidráulico (yugo de aplicación de carga). Éste es manipulado por una bomba hidráulica separada, la cual tiene un expositor digital de carga. Este aparato incluye un pistón de carga. La inclinación de los platos de carga debe ser como máximo 2° con respecto a la dirección de corte durante el ensayo.

Sistema de aplicación de la carga horizontal, sistema motorizado que tiene la capacidad de aplicar una fuerza horizontal a la muestra, con una velocidad de desplazamiento constante en la dirección paralela al movimiento de la caja de corte. El aparato medidor de la fuerza, calibrado y montado apropiadamente, es un anillo dinamométrico (*Nota 2*).

Medidores de desplazamiento, son transductores de desplazamiento, debidamente montados, para medir el desplazamiento horizontal relativo entre las dos mitades de la caja de corte y el desplazamiento vertical de la muestra durante el ensayo. Estos medidores de desplazamiento son LVDT (Linear variable differential transformes) capaces de medir un desplazamiento máximo de 50 mm para el desplazamiento horizontal, y 25 mm para el desplazamiento vertical.

Aparatos de sujeción de geosintéticos, necesarios para fijar las muestras de geosintéticos a la sección fija o mitad superior de la caja de corte, y/o a la sección móvil o mitad inferior de dicha caja durante el corte. Las muestras de geosintético deben permanecer planas durante el corte. Los aparatos de sujeción de geosintéticos son los siguientes: soporte rígido superior, soporte rígido inferior, placa metálica dentada, chapa metálica galvanizada, y cinta adhesiva de doble cara.

Soporte rígido inferior, superficie metálica plana 299x299 mm y espesor de 30 mm, esta pieza contiene una mordaza en uno de los lados, donde va sujeto el geosintético, y cuatro patas regulables que permiten colocar dicha superficie a la altura adecuada para realizar el corte. El soporte es situado en el interior de la mitad inferior de la caja de corte.

Soporte rígido superior, Figura 1.1, superficie metálica plana 299x299 mm y espesor de 30 mm. Esta pieza contiene una mordaza en uno de los lados, donde va sujeto el geosintético. El soporte es colocado en el interior de la mitad superior de la caja de corte.



Figura 1.1 Soporte rígido superior

Placa metálica dentada, Figura 1.2, pieza metálica de dimensiones 299x284x10 mm, de superficie plana con rugosidades de 1 mm de altura al tresbolillo. Esta superficie está perforada para permitir el flujo de agua dentro y fuera de la muestra ensayada. Esta pieza va unida al soporte rígido mediante tornillos. Se puede utilizar para sujetar geomembranas, GCLs y geocompuestos de drenaje

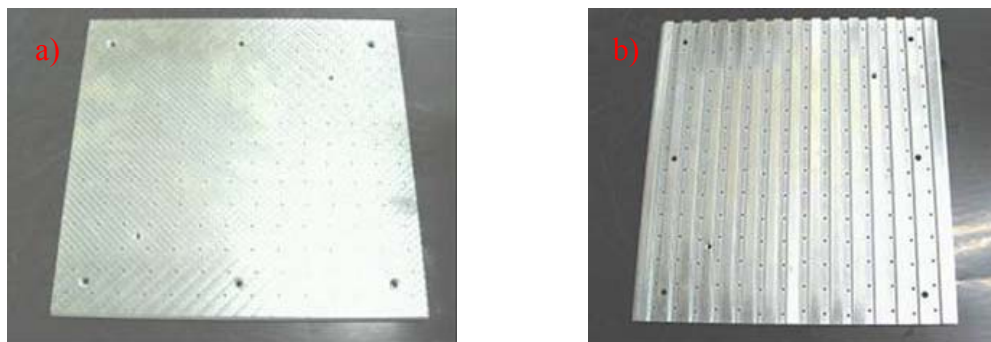


Figura 1.2 Placa metálica dentada a) cara superior b) cara inferior

Cinta adhesiva de doble cara para pegar al soporte rígido geotextiles y geomembranas lisas. Este último caso es una alternativa al uso de la placa dentada.

Placa metálica galvanizada, Figura 1.3, chapa de dimensiones 299mmx299mmx2 mm donde va pegada la geomalla mediante resina epoxy, y placa de dimensiones 299mmx282x2mm donde va pegado el geotextil mediante la cinta adhesiva de doble cara. A su vez dicha placa va atornillada al soporte rígido inferior.

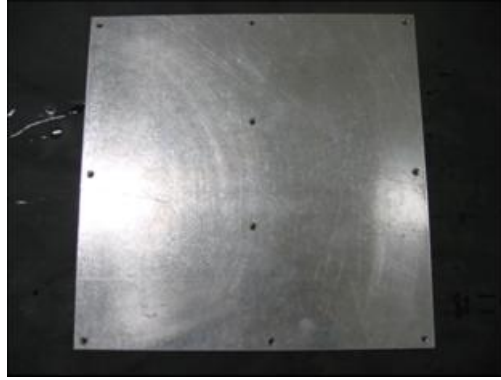


Figura 1.3 Placa metálica galvanizada

Equipo de preparación de suelo. Para la preparación de muestras de suelo, puede ejecutarse una compactación dinámica según las normas UNE 103500 (Proctor normal) y UNE 103501 (Proctor modificado). Alternativamente pueden prepararse a estas mismas densidades por compactación estática, mediante la aplicación de una carga vertical aplicada por una prensa y utilizando el siguiente aparato de compactación. Este aparato consiste en atornillar el soporte rígido superior pequeño a una pieza tope de acero (Figura 1.4 y Figura 1.5).

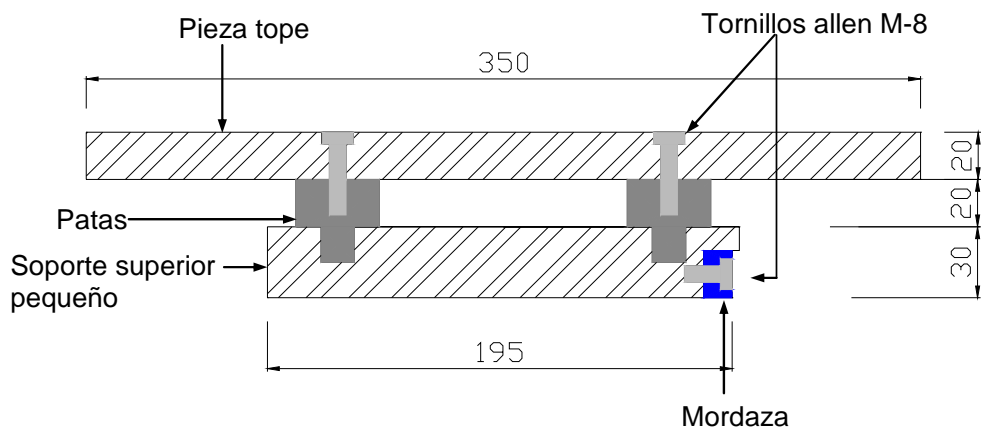


Figura 1.4 Sección transversal del aparato de compactación

Mitad superior pequeña de la caja de corte, para su uso en suelos. Consiste en un bastidor de dimensiones 200mmx200mmx100mm para ensayar suelo y geosintético. El bastidor superior pequeño va atornillado al bastidor superior grande, y en su interior se coloca el suelo que posteriormente se compacta estáticamente (Figura 1.5).

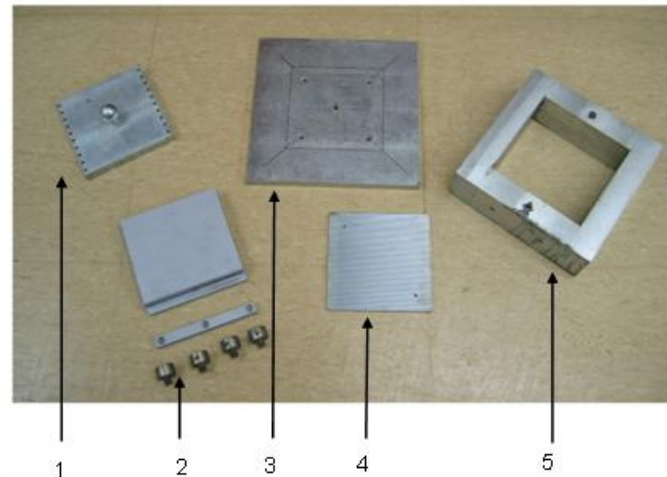


Figura 1.5 Piezas para realizar ensayos con suelos

- 1 *Pistón de carga 198 mm x 198 mm*
- 2 *Soporte superior 198 mm x 198 mm x 30 mm. (Base, mordaza, patas)*
- 3 *Pieza tope del aparato de compactación 350 mm x 350 mm x 20 mm*
- 4 *Placa con ranuras 198 mm x 198 mm*
- 5 *Bastidor superior pequeño de caja de corte 200 mm x 200 mm x 100 mm*

Nota 1—la posición de la mitad superior de la caja de corte debe ser ajustable en la dirección vertical, para compensar la deformación de los geosintéticos y permitir que el plano de corte se produzca de forma adecuada. Las dos mitades en que se divide la caja de corte deben estar alineadas, para minimizar cualquier momento producido por la no co linealidad de éstas.

Nota 2—se debe escoger el anillo dinamométrico de capacidad más adecuada en función del tipo de ensayo, tipo de geosintético, tensión normal aplicada, la resistencia al corte esperada y de la experiencia. Se deberá disponer de una gama de anillos dinamométricos que abarque el rango posible de valores de la fuerza tangencial (se recomienda una rango entre 2.5 y 50 kN).

1.3 Preparación de las muestras de geosintéticos

Lote—el producto se divide en lotes, cada lote consta de un número específico de unidades (rollos, panales, etc.) designado por el fabricante. Se toma un lote al azar para ser ensayado, indicando su número.

Muestra para laboratorio—los rollos del lote elegido para ensayar se toman como muestras para el laboratorio. Se coge un rollo y se corta a lo ancho, perpendicular a la dirección de la máquina (dirección de longitud del rollo), una muestra de longitud adecuada para obtener todas las probetas necesarias (*Nota 3*). En estas muestras se debe indicar el número de lote al que pertenecen, y la dirección de fabricación paralela a la dirección de la máquina. Estas muestras no deben estar dañadas y deben estar bien embaladas.

Probetas—deben estar exentas de impurezas, irregularidades, arrugas, agujeros u otros deterioros; las secciones que contengan estos defectos se deben desechar a efectos de la toma de muestras. Se deben cortar un mínimo de tres probetas para realizar el corte en la dirección de fabricación, y tres probetas para realizar el corte en la dirección perpendicular a la fabricación, si se requiere (*Nota 4*). Las probetas deben tener un tamaño determinado para fijarlas de forma adecuada, y facilitar la sujeción con mordaza si se precisa (*Nota 5*). Las probetas se cortan a lo largo de la diagonal de la muestra para laboratorio, espaciadas unas de otras como mínimo 100 mm. Las probetas se toman a partir 1/10 del ancho de la muestra para laboratorio y nunca menos de 100 mm del borde de dicha muestra.

Nota 3—por ejemplo si se desean obtener cuatro probetas, al laboratorio deben llegar muestras de dimensiones: ancho de rollo x 2.5 m de largo como mínimo.

Nota 4—las características friccionales de algunos geosintéticos pueden depender de la dirección ensayada. En muchos casos sólo es necesario realizar el ensayo de corte en una dirección. En estos casos la dirección de corte debe ser anotada claramente en las muestras de geosintéticos.

Nota 5—se pueden considerar las dimensiones siguientes para facilitar el amarre y sujeción de las probetas de los siguientes geosintéticos:

<i>Geotextil sujeto con mordaza:</i>	<i>350x350 mm</i>
<i>Geomembrana:</i>	<i>300x282 mm</i>
<i>GCL:</i>	<i>300x310 mm</i>
<i>Geomalla:</i>	<i>300x300 mm</i>
<i>Geocompuesto drenante:</i>	<i>350x350 mm</i>

La dimensión final de las probetas una vez sujetas con el método de sujeción correspondiente a cada tipo de geosintético es:

<i>Geotextil sujeto con mordaza:</i>	<i>300x282 mm</i>
<i>Geomembrana:</i>	<i>300x282 mm</i>
<i>GCL:</i>	<i>300x282 mm</i>
<i>Geomalla:</i>	<i>300x300 mm</i>
<i>Geocompuesto drenante:</i>	<i>300x282 mm</i>

1.4 Acondicionamiento del ensayo y las muestras

Los ensayos de rozamiento entre geosintéticos deben realizarse en un ambiente con una humedad relativa del $65\% \pm 5\%$ y una temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para los ensayos de rozamiento entre un suelo y un geosintético, el peticionario elegirá la atmósfera adecuada para la realización de la prueba. Si no existe un criterio de acondicionamiento específico, el ensayo se debe llevar a cabo con las condiciones anteriormente citadas.

Cuando el geosintético se ensaya en condiciones saturadas, la muestra debe estar sumergida en agua de grifo en el interior de la cámara húmeda un período mínimo de 24h antes de ser ensayada (fase de hidratación)

Observación: Existen geosintéticos (geomembranas, geomallas) que absorben cantidades despreciables de agua y pueden no necesitar 24h para su saturación (*Notas 6, 7 y 8*).

Nota 6—se elije realizar la hidratación de los geosintéticos con agua de grifo atendiendo a las conclusiones de la investigación realizada por Pasqualini et al. (2002), de la que se ha deducido que los ensayos realizados con geosintéticos no envejecidos (sin permanecer días en contacto con lixiviado) y agua de grifo, dan resultados semejantes a los ensayos realizados con geosintéticos no envejecidos y lixiviado activo (lixiviado no estancado).

Nota 7—la fase de hidratación de los diferentes geosintéticos se puede realizar de la siguiente forma:

Geotextil, Geocompuesto de drenaje, —se introduce en un recipiente poco profundo con suficiente agua de grifo para cubrir la muestra, dejándolo en cámara húmeda durante 24h.

Geomembrana, Geomalla— no es necesario sumergir estos geosintéticos en agua, debido a que son materiales impermeables.

GCL— se introduce en un recipiente poco profundo con suficiente agua de grifo para cubrir la muestra y bajo una presión normal de 1 kPa, todo ello se deja en la cámara húmeda durante 48h (Nota 9).

Nota 8—el período de tiempo correspondiente a la fase de hidratación de la GCL se ha obtenido comprobando, tras numerosos ensayos, que 48h de hidratación en la cámara húmeda (fase de hidratación) y 24h sumergida en agua en el interior de la máquina de corte directo bajo la tensión normal de consolidación (fase de consolidación), son intervalos de tiempo adecuados con los que se llega al equilibrio de ambas fases (Fox et al., 1998).

1.5 Procedimiento A: Interfaz geosintético/geosintético

1. Hay que colocar la muestra de geosintético inferior completamente plana sobre el soporte rígido de sujeción en la mitad inferior del aparato de corte directo, y dejar que dicha muestra sobresalga por encima del plano superior de la mitad inferior de la caja de corte. El sistema de sujeción elegido debe ser adecuado a cada material, ver los distintos tipos en el apartado 1.2 (Notas 9 y 10)

Nota 9—Sistemas de sujeción de los diferentes geosintéticos:

Geomembrana. *Se atornilla a la placa dentada. En el caso de la geomembrana lisa también se puede pegar con cinta de doble cara adhesiva sobre la chapa metálica galvanizada, que se atornilla, a su vez, al soporte rígido superior o inferior. En el caso de geomembrana de doble cara rugosa, las rugosidades de la cara que vaya a estar en contacto con la placa dentada se deben eliminar con una cuchilla, para que esta cara quede completamente lisa y se puedan clavar los dientes con facilidad, evitando así que la geomembrana deslice con respecto a la placa dentada.*

Geotextil. *Se pega con cinta de doble cara adhesiva a la chapa metálica galvanizada, atornillando ésta al soporte rígido superior o inferior.*

Geomalla. *Se pega con resina epoxy a la chapa metálica galvanizada, que va atornillada al soporte rígido inferior.*

Geocompuesto, GCL. *Si se ensaya con otro geosintético, la GCL se coloca en contacto con la placa dentada y se amordaza (normalmente el geotextil en contacto con la placa) al soporte rígido. La placa dentada va atornillada a dicho soporte. Si se ensaya el*

geocompuesto solo o la GCL sola, se coloca entre dos placas dentadas atornilladas a su respectivo soporte, amordazando el geotextil situado debajo al soporte inferior.

Nota 10—Para evitar que los geosintéticos se muevan durante su colocación en la caja de corte, puede ser necesario pegarlos con un trozo pequeño de cinta adhesiva de doble cara a la placa dentada. Una excepción es la GCL hidratada, que una vez colocada en el soporte rígido superior, para evitar su caída durante la introducción en la caja de corte se requiere pasar un hilo fino a través del borde de la muestra opuesto al que está amordazado, sosteniendo dicho hilo hacia arriba y así se evita que la GCL se caiga durante su colocación. Una vez colocada se tira del hilo para sacarlo.

1.1 Si el ensayo se realiza con muestras saturadas, la probeta se extrae de la cámara húmeda y se seca la superficie superior para que no exista exceso de agua sobre ella. Hay que comenzar el ensayo tan pronto como sea posible una vez que la muestra está fuera de la cámara húmeda.

2. Se colocan las dos mitades de la caja de corte juntas y alineadas en la posición inicial. Se sujeta la muestra de geosintético superior sobre el soporte rígido superior mediante un sistema adecuado, ver los distintos tipos en el apartado *Aparatos (aparatos de sujeción de geosintéticos)* (Nota 9 y 10). Se introduce el conjunto, soporte rígido superior más muestra, en el interior de la caja del siguiente modo: geosintético superior sobre geosintético inferior. Ambas muestras se deben colocar planas, libres de pliegues, arrugas, etc., y deben estar totalmente en contacto dentro del área de ensayo.

3. Se coloca el pistón de carga sobre el soporte rígido superior y se aplica la tensión normal de consolidación a la muestra. Si el ensayo es en condiciones saturadas, se inunda la muestra y se controla el desplazamiento vertical hasta que se alcanza el equilibrio (Nota 11 y Nota 12)

Nota 11—la aplicación secuencial de la carga de consolidación y la inundación dependerán de las condiciones de campo que se desee simular ya que la secuencia de ensayo se debe adaptar a dichas condiciones. Por ejemplo se realizará primero la inundación y después la aplicación de carga de consolidación para simular las condiciones pésimas en la impermeabilización y sellado de vertederos.

Nota 12—tras numerosos ensayos realizados con distintos tipos de geosintéticos se puede tomar como referencia los tiempos de consolidación siguientes:

Interfaz Geosintético/Geosintético, excepto GCL: ensayo en condiciones secas y húmedas: 5 min

Interfaz GCL/Geosintético, ensayo en condiciones secas: 5 min, ensayo en condiciones saturadas: 24h. En el caso de ensayo en condiciones secas de GCL ligeramente humedecida, tiempo de consolidación de 24h.

4. Se coloca el aparato que transmite la fuerza de corte en contacto con la mitad móvil de la caja de corte pero sin aplicar fuerza tangencial. Se crea un hueco entre la mitad superior e inferior de la caja, suficientemente grande como para prevenir el rozamiento entre las dos mitades, y entre la caja y la muestra. Se pone vaselina en la punta de los tornillos que levantan la mitad superior respecto a la mitad inferior de la caja, para evitar el rozamiento de dichos tornillos separadores con la mitad inferior. Se pone a cero todos los medidores de desplazamiento.

5. Se aplica la fuerza de corte mediante una velocidad de desplazamiento constante. La velocidad de desplazamiento debe ser fijada por el usuario, y ser lo suficientemente lenta para que el exceso de presión intersticial que se produce durante el corte sea insignificante. En ausencia de especificaciones concretas, se debe aplicar una velocidad de desplazamiento máxima de 5 mm/min. (Nota 13)

Nota 13—Se consideran adecuadas las siguientes velocidades de desplazamiento:

Interfaz Geosintético/Geosintético: 5 mm/min.

Diversas investigaciones concluyen que la velocidad de desplazamiento no afecta significativamente a los valores de la tensión tangencial de pico y residual (Stark et al., 1996; Triplett y Fox, 2001)

Geosynthetic Clay Linear sola: de 0.01 a 1 mm/min.

Si se pretende obtener exclusivamente el valor de la tensión tangencial post-pico o residual, se pueden utilizar velocidades de desplazamiento elevadas (por ejemplo, 1 mm/min.). Para tensiones normales bajas (menores de 100 kPa), se debe emplear velocidades de desplazamiento entre 0.01 y 0.1 mm/min., para tensiones normales altas (>100 kPa), se pueden emplear velocidades de desplazamiento entre 0.1 y 1 mm/min. (Fox et al., 1998; Zornberg et al., 2005; Gilbert et al., 1997; Gilbert et al., 1996; Eid et al., 1999)

6. Hay que registrar la fuerza de corte en función del desplazamiento horizontal.

7. Se continúa el ensayo hasta que el desplazamiento horizontal es de 50 mm para una longitud de superficie de corte de 300 mm (*o el 16.5% de la superficie de corte en otros casos, norma UNE-EN ISO 12957-1*)

8. Al terminar el ensayo, se elimina la tensión normal sobre la muestra y se desmonta el aparato de corte cuidadosamente. Se debe inspeccionar la superficie de rotura para identificar los mecanismos de rotura que se han producido. Anótense evidencias de deformaciones debidas al corte en la muestra o en las mordazas.

8.1 Las evidencias de deformaciones debidas al corte en la muestra ensayada, que no son típicas de otras muestras ensayadas, pueden dar lugar al descarte de dicha muestra y a repetir el proceso. Si existe un exceso de deformaciones tangenciales en la muestra, u ocurre el deslizamiento de ésta respecto al soporte, se puede repetir el ensayo a una tensión normal más baja.

9. Repítase el ensayo con diferentes tensiones normales utilizando nuevas muestras de geosintéticos. El ensayo constará como mínimo de tres muestras, cada una con una tensión normal diferente diseñada por el usuario (*Nota 14*).

Nota 14—se puede utilizar presiones normales de 100kPa, 300kPa y 450kPa para los ensayos de impermeabilización de vertedero de residuos municipales y presiones normales de 50kPa, 100kPa y 150kPa para ensayos de sellado de vertedero.

Se representan los datos obtenidos del ensayo en un gráfico fuerza tangencial-desplazamiento horizontal. En este gráfico identificar los valores límites de la fuerza (fuerza tangencial de pico y fuerza tangencial post-pico o fuerza tangencial residual). Se determinan los desplazamientos horizontales para estas fuerzas cortantes.

1.6 Procedimiento B: Interfaz suelo/geosintético

1. Se coloca suelo en la mitad superior de la caja de corte. Se compacta el suelo con una humedad específica hasta conseguir la densidad deseada. Si se trata de un suelo fino debe sobresalir aproximadamente 1 mm del plano inferior de la mitad superior de la caja de corte. En cualquier otro caso debe sobresalir no menos de $\frac{1}{2}d_{85}$, del suelo, según la norma ASTM D 3080. (*Nota 15*)

Nota 15—La compactación del suelo puede realizarse mediante el procedimiento de aplicación de una carga estática sobre su superficie por medio de una

prensa. El valor de dicha carga y el tiempo de aplicación debe ser suficiente para obtener el peso específico seco buscado (normalmente el Proctor normal o el Proctor modificado). Es posible que el valor de la fuerza vertical necesaria sea superior al que puede proporcionar la prensa disponible. En este caso el bastidor superior que constituye la mitad superior de la caja de corte puede ser sustituido por otro de menor dimensión (por ejemplo 200x200 mm) para albergar y compactar el suelo. En todo caso es importante aplicar vaselina en el contorno interior de la mitad superior de la caja de corte, para facilitar la fase de consolidación del suelo.

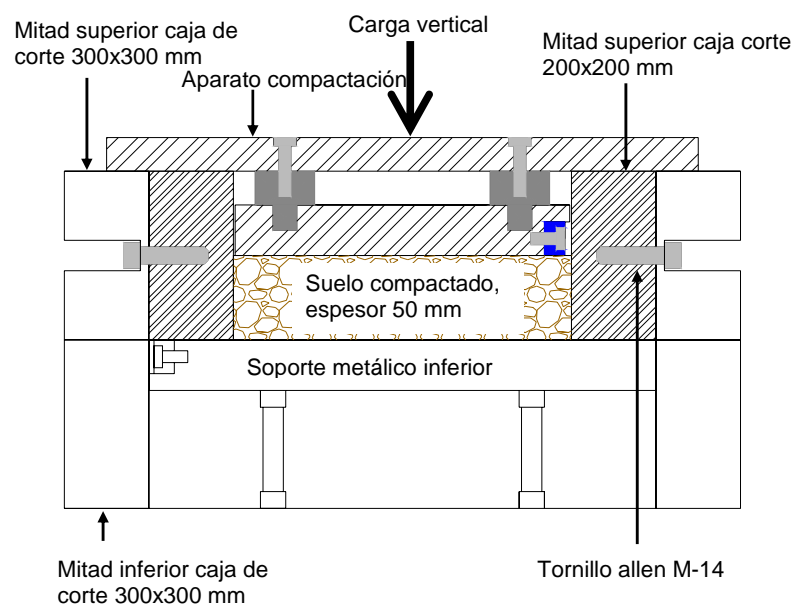


Figura 1.6 Esquema del final de la compactación estática

2. La muestra de geosintético inferior se debe colocar completamente plana sobre el soporte rígido de sujeción en la mitad inferior del aparato de corte directo, y dejar que dicha muestra sobresalga un poco por encima del plano superior de la mitad inferior de la caja de corte. El sistema de sujeción elegido debe ser el adecuado para cada material. Véanse los distintos tipos en el apartado: apartado 1.2 (Nota 9 y 10)

3. Sobre el geosintético inferior se coloca el suelo compactado, que está dentro de la mitad superior de la caja de corte. Se juntan y fijan las dos mitades de la caja de corte en la posición inicial. Se coloca el pistón de carga y se aplica la tensión normal de consolidación. Si se trata de un ensayo en condiciones sumergidas, se inunda la muestra y se controlan los desplazamientos verticales hasta que se llegue al equilibrio (Nota 11 y Nota 16)

Nota 16—se puede tomar como referencia los tiempos de consolidación siguientes:

Interfaz Suelo/Geosintético, excepto GCL: ensayo en condiciones secas y húmedas: 10 min.

Interfaz Suelo/GCL, ensayo en condiciones secas: 10 min, ensayo en condiciones húmedas: 24h. En el caso de ensayo en condiciones secas de GCL ligeramente humedecida, tiempo de consolidación de 24h.

4. Se coloca el aparato que transmite la fuerza cortante en contacto con la mitad móvil de la caja de corte pero sin aplicar fuerza tangencial. Se debe establecer un hueco entre la mitad superior e inferior de la caja, suficientemente grande como para prevenir el rozamiento entre las dos mitades de la caja, y entre la muestra y la caja. Se pone vaselina en la punta de los tornillos que levantan la mitad superior respecto a la mitad inferior de la caja, para evitar el rozamiento de los tornillos separadores con la mitad inferior. Poner a cero los medidores de desplazamiento.

5. Se aplica la fuerza de corte mediante una velocidad de desplazamiento constante. La velocidad de desplazamiento debe ser suficientemente lenta para que se puedan disipar las presiones intersticiales del suelo (*Nota 17*), y se fija previamente por el peticionario. Si los excesos de presiones intersticiales no son previsibles, y en ausencia de especificaciones concretas por parte del peticionario, aplíquese la fuerza tangencial a velocidad de 1mm/min.

Nota 17— Se consideran adecuadas las siguientes velocidades de desplazamiento:

Interfaz Suelo/Geosintético (suelo compactado a Proctor normal o modificado): 1 mm/min. Las presiones intersticiales que se pudieran originar en la interfaz se disipan, porque el agua está en contacto con la atmósfera, máxime cuando se ensaya un geotextil, geomalla, o geocompuesto (Sharma et al., 2007).

6. Se registra la fuerza de corte en función del desplazamiento horizontal.

7. Se continúa el ensayo hasta que el desplazamiento horizontal es de 50 mm para una longitud de superficie de corte de 300 mm (*o el 16.5% de la superficie de corte en otros casos*) (*norma UNE-EN ISO 12957-1*).

8. Se eliminan la tensión normal y se desmonta el aparato al final del ensayo. Se debe inspeccionar cuidadosamente e identificar la superficie de rotura y el área de sujeción.

9. Al final del ensayo, se saca la muestra de suelo para determinar la densidad y humedad.

10. Se repite el proceso para un mínimo de tres tensiones normales de compresión diferentes.

11. Se representan los datos obtenidos del ensayo en un gráfico—fuerza tangencial-desplazamiento horizontal. En este gráfico se identifican los valores límites de la fuerza (fuerza tangencial de pico y fuerza tangencial post-pico o fuerza tangencial residual). Se determinan los desplazamientos horizontales para estas fuerzas cortantes.

1.7 Análisis e interpretación de resultados

1. Se calcula el valor medio de la tensión de corte aplicada a la muestra para cada valor de la fuerza horizontal registrada durante el ensayo de la forma siguiente:

$$\tau = \frac{F_h}{A_c}$$

donde:

τ = tensión tangencial (kPa),

F_h = fuerza horizontal (kN),

A_c = área corregida, área de contacto (m²) (Nota 19).

2. Una vez obtenidos los resultados de la tensión tangencial, sobre cada una de las curvas tensión tangencial-desplazamiento horizontal se establecen dos tensiones de rotura: tensión de pico (τ_{pico}) y tensión residual ($\tau_{residual}$) (Nota 20). Los puntos (($\sigma_{pico}, \tau_{pico}$), ($\sigma_{residual}, \tau_{residual}$)) se representan en la gráfica tensión tangencial-tensión normal. Los ejes de tensión tangencial y tensión normal deben dibujarse con la misma escala. Se ajustan los puntos dibujados en la gráfica a una línea recta $\tau = c_a + \omega \cdot \sigma$, la cual se denomina envolvente de rotura. Se requiere criterio y experiencia para el ajuste. La pendiente de la envolvente de tensiones es el coeficiente de fricción o rozamiento. El ángulo de rozamiento se determina con la siguiente ecuación:

$$\phi_p = \tan^{-1}(\omega)$$

donde:

ϕ_p = ángulo de rozamiento correspondiente a la tensión tangencial de rotura (grados),

ω = coeficiente de rozamiento correspondiente a la tensión tangencial de rotura,

c_a = adhesión. Valor de la intersección de la envolvente de rotura con el eje de ordenadas (eje de tensión tangencial)

El ángulo de rozamiento y la adhesión interceptada se calculan tanto para los valores de tensión tangencial de pico como tensión tangencial residual.

La representación de la envolvente de rotura sólo es válida dentro del rango de tensiones normales ensayadas, no debiéndose extrapolar los resultados. En caso de necesitar valores fuera de dicho rango es necesario ejecutar ensayos para las tensiones normales requeridas.

Nota 18— El área de contacto es variable a lo largo del ensayo en función del desplazamiento relativo entre ambas mitades de la caja de corte.

Nota 19— Esta elección se realiza según el siguiente criterio: el valor τ_{pico} se obtiene como el promedio de los mayores valores de la curva, y cuya diferencia entre ellos no supere ± 2 kPa, y el valor $\tau_{residual}$ se calcula como el promedio de los menores valores de la curva, y cuya diferencia entre ellos no supere ± 2 kPa

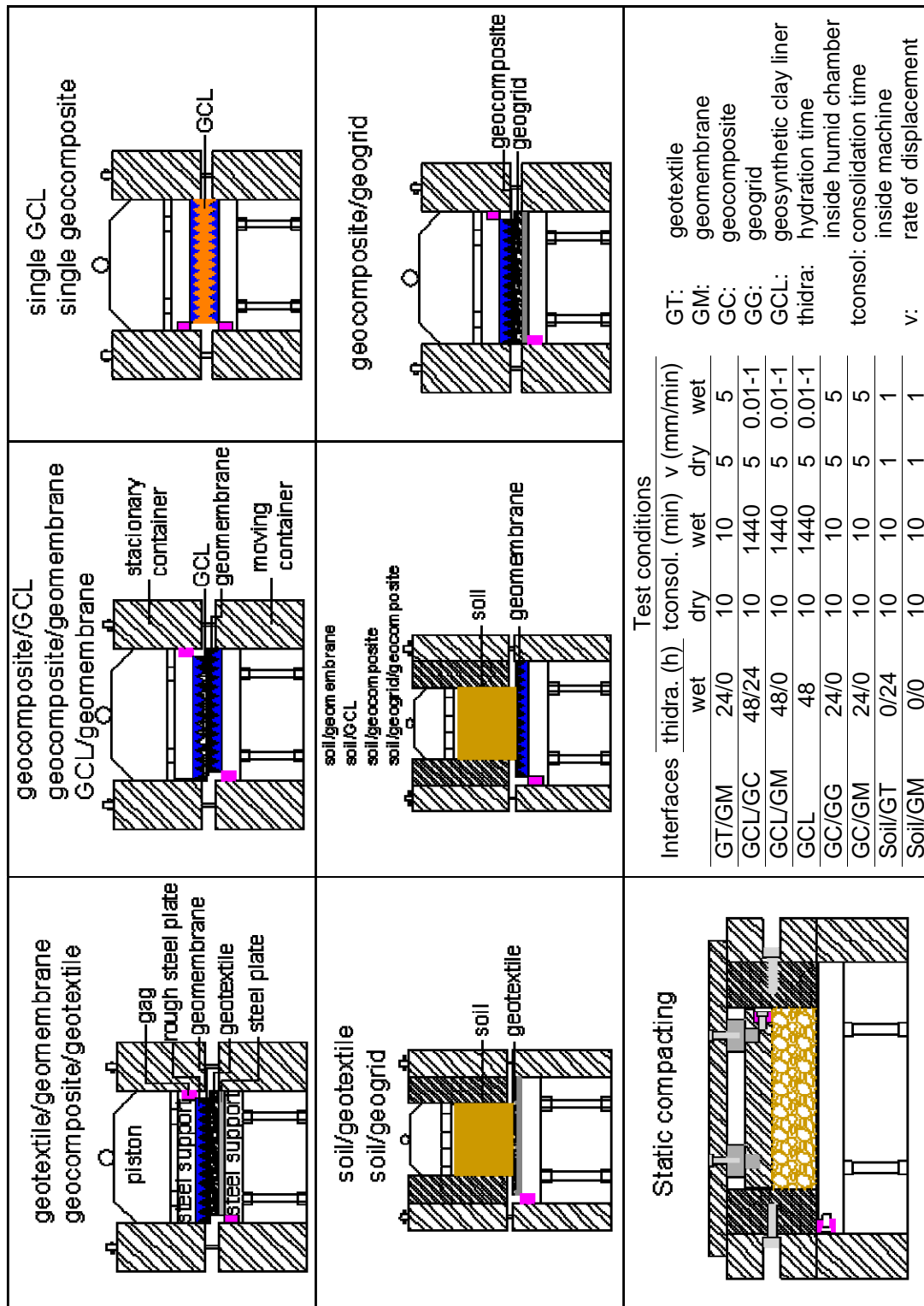


Figura 1.7 Esquemas tipo del ensayo de corte directo 300x300 mm para las interfaces geosintético/geosintético y suelo/geosintético

2 Máquina de corte directo utilizada en la investigación

2.1 Diseño comercial de la máquina de corte

El aparato de corte directo que fabrica Wfi, mide 2.4 m de largo, 0.55 m de ancho, y 1.35 m de alto. Este aparato ha sido diseñado para realizar ensayos con suelos, gravas, rocas y contiene diversas adaptaciones para ensayar geosintéticos.

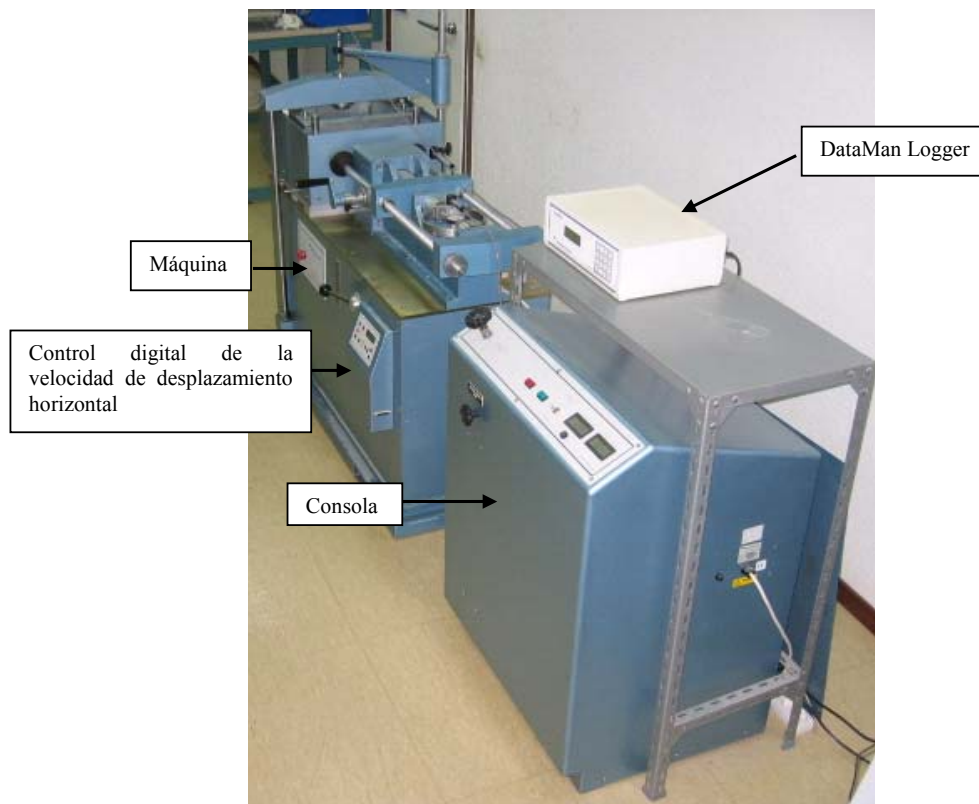


Figura 2.1 Máquina de corte directo 300x300 mm

Este aparato de corte se diseñó para cortar horizontalmente una muestra de suelo o roca, bajo una carga vertical aplicada. Esta máquina también aporta diversas adaptaciones para ensayar geosintéticos.

Las principales funciones del aparato de corte directo son:

- Un sistema de carga horizontal para proporcionar una velocidad de desplazamiento constante.
- Un sistema de carga vertical para proporcionar la tensión vertical.
- Instrumentación para proporcionar las mediciones de la fuerza de corte, y el desplazamiento horizontal y vertical de la muestra durante el ensayo.

Estos parámetros dan suficiente información sobre las propiedades resistentes de los materiales.

Este equipo lo forman dos unidades: la consola y la máquina, ambas están conectadas mediante dos tuberías. La consola contiene el sistema hidráulico, éste tiene una válvula resorte comprimida muy sensible, la cual, una vez ajustada manualmente la carga vertical deseada para la consolidación, mantiene automáticamente esa carga. La máquina contiene dos motores paso a paso que proporcionan la fuerza de corte horizontal.

A continuación se muestran las diferentes partes que componen la máquina:

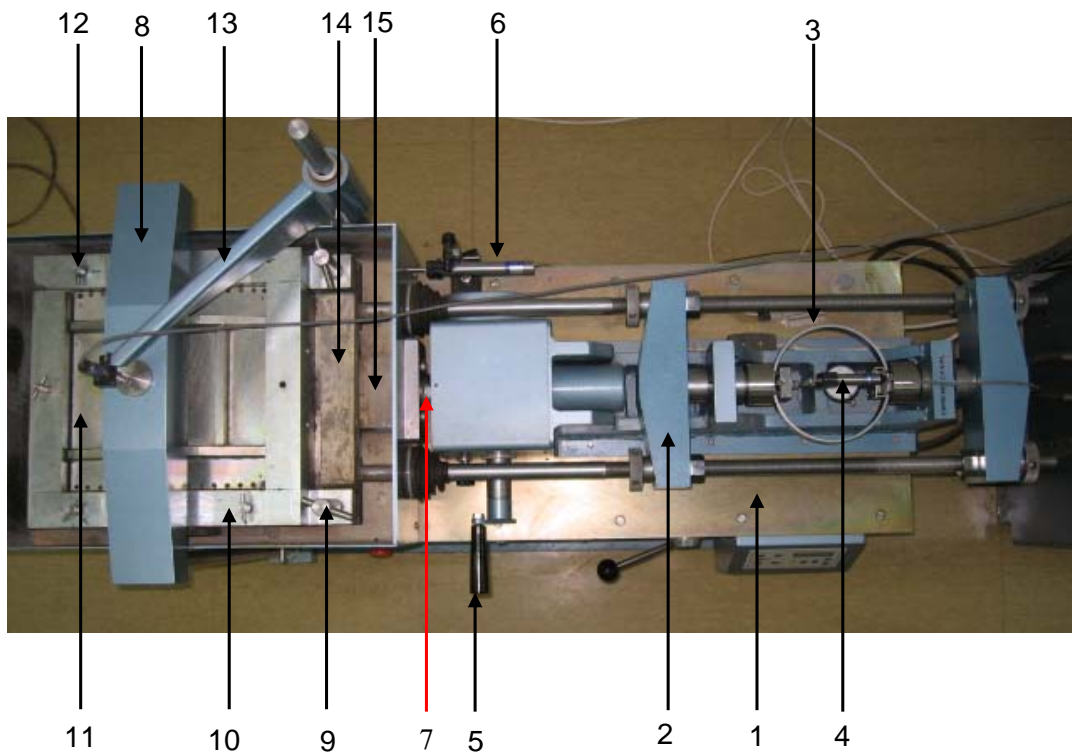


Figura 2.2 Vista en planta de la máquina

- 1 Plataforma soporte del aparato
- 2 Bastidor rígido estático, transmite la reacción horizontal al anillo dinamométrico
- 3 Anillo dinamométrico, usado para medir la reacción horizontal
- 4 Transductor que mide la reacción horizontal
- 5 Manivela para desplazar manualmente la mitad inferior de la caja de corte
- 6 Transductor que mide el desplazamiento horizontal
- 7 Tornillo sin fin, transmite la velocidad de desplazamiento constante

- 8 Yugo de carga, transmite la carga vertical al pistón de carga
- 9 Tornillos que sujetan la mitad superior de la caja de corte al bastidor rígido estático, mediante una viga metálica transversal
- 10 Caja de corte metálica (300 mm x 300 mm)
- 11 Pistón de carga, transmite y reparte la carga vertical a la muestra
- 12 Tornillos que permiten separar la mitad superior de la mitad inferior de la caja de corte
- 13 Brazo para sujetar el transductor que mide desplazamientos verticales
- 14 Viga transversal unida al bastidor rígido estático
- 15 Elemento metálico que engancha la mitad inferior de la caja de corte al cajón móvil exterior.

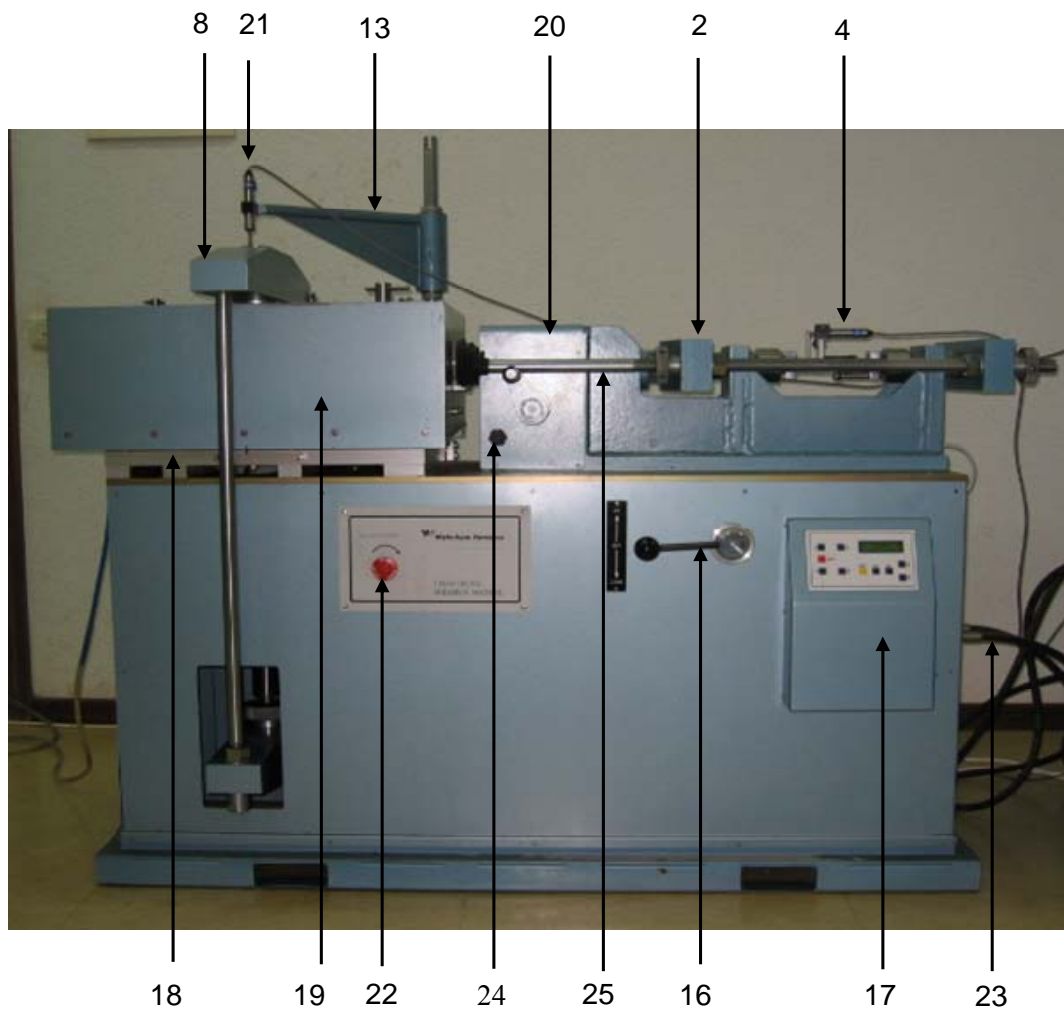


Figura 2.3 Vista en alzado de la máquina

- 16 Palanca para subir y bajar el yugo de carga
- 17 Controlador digital de la velocidad de desplazamiento horizontal, permite al usuario conducir los motores paso a paso en dos direcciones diferentes, así proporciona una dirección hacia delante o hacia atrás a la fuerza aplicada.
- 18 Soporte con guías donde apoya el cajón móvil exterior, permite deslizar el cajón sin rozamiento
- 19 Cajón o carro deslizante exterior
- 20 Elemento que protege el tornillo sin fin
- 21 Transductor que mide el desplazamiento vertical
- 22 Botón parada de emergencia
- 23 Tuberías que conectan la máquina con la consola
- 24 Palanca para pasar del sistema manual al sistema automático de aplicación de movimiento del cajón móvil exterior
- 25 Barras metálicas roscadas que forman parte del bastidor rígido estático

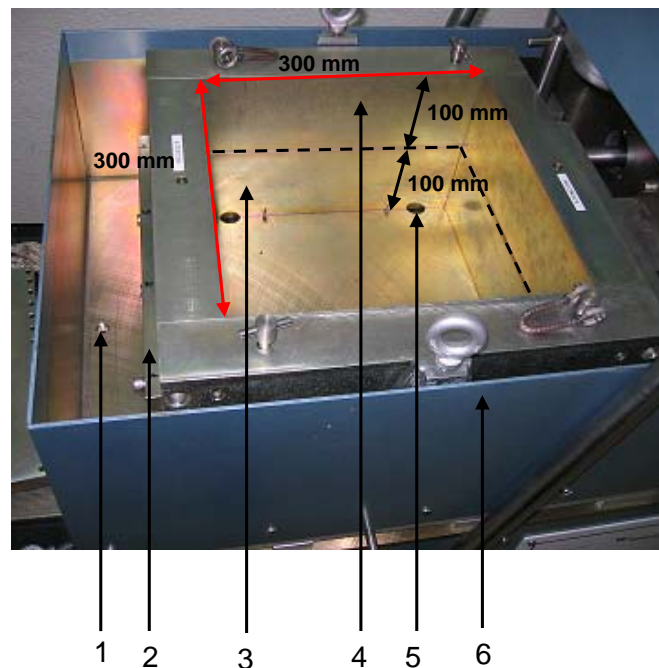


Figura 2.4 Caja de corte directo 300x300 mm

- 1 Agujero de desagüe
- 2 Mordaza exterior para sujetar el geosintético
- 3 Mitad inferior móvil de la caja de corte
- 4 Mitad superior fija de la caja de corte
- 5 Agujero que permite la entrada y salida del fluido a la muestra
- 6 Cajón o carro exterior deslizante

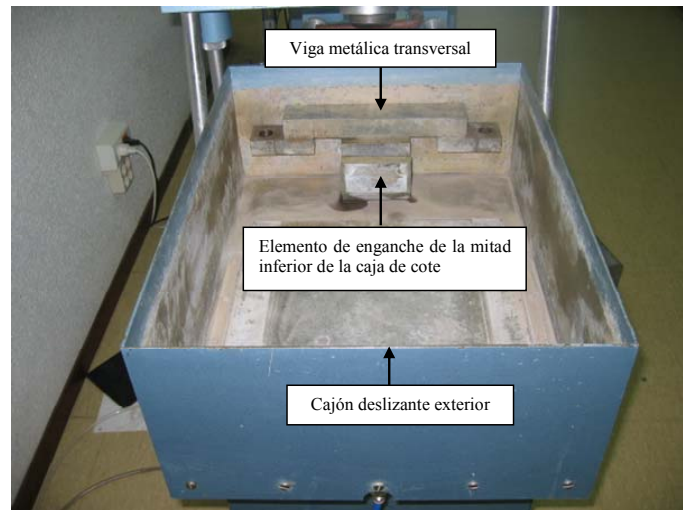


Figura 2.5 Sistema de sujeción de la mitad superior e inferior de la caja de corte

La viga metálica transversal está unida únicamente al bastidor rígido estático mediante dos barras roscadas. Esta viga tiene la misión de sujetar a la mitad superior de la caja de corte, para que se mantenga fija durante todo el ensayo, mediante dos tornillos.

El elemento de enganche de la mitad inferior de la caja de corte, contiene un hueco con forma de medio cilindro donde va encajada una barra metálica, que sobresale de la parte inferior de la caja de corte. Este elemento de enganche está a su vez unido al cajón deslizante exterior, y al tornillo sin fin que transmite la velocidad de desplazamiento horizontal. El cajón deslizante exterior permite que se puedan realizar ensayos con muestras sumergidas en un fluido.

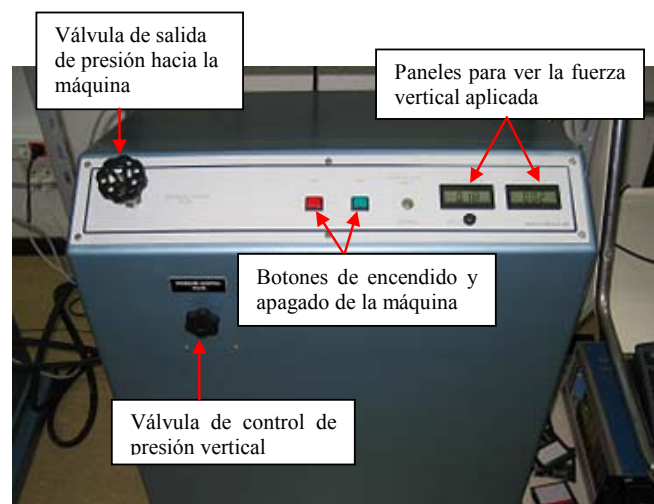


Figura 2.6 Consola que contiene el sistema hidráulico para transmitir la carga vertical a la muestra



Figura 2.7 DataMan Logger. Aparato para la entrada y salida electrónica de datos del ensayo, dispone de una interfaz RS232 que permite el control por ordenador

Tabla 1: Especificaciones técnicas de la máquina de corte directo	
Descripción	Especificación
Área máxima de la muestra (vista en planta)	300 mm x 300 mm
Permite introducir muestras de dimensiones	150 mm x 150 mm 225 mm x 225 mm
Espesor máximo de la muestra	200 mm
Máxima fuerza vertical	100 kN
Máxima fuerza horizontal	100 kN
Rango de velocidad de desplazamiento horizontal	0 a 10 mm/min
Máximo desplazamiento horizontal	60 mm
Peso	930 kg

Los sistemas de sujeción de geosintéticos comerciales que trae la máquina de corte directo son:

- Una mordaza colocada en la parte trasera inferior de la mitad superior de la caja de corte (ver Figura 2.4)
- Un soporte metálico inferior, de dimensiones (298 mm x 298 mm x 30 mm), de altura regulable, y con una mordaza en uno de los lados. Se coloca en el interior de la mitad inferior de la caja de corte (ver Figura 2.8)

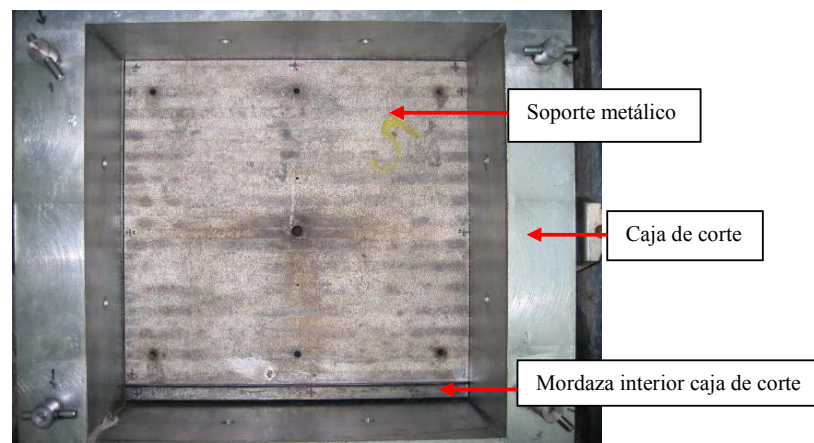


Figura 2.8 Vista en planta del soporte metálico inferior del geosintético en el interior de la caja de corte

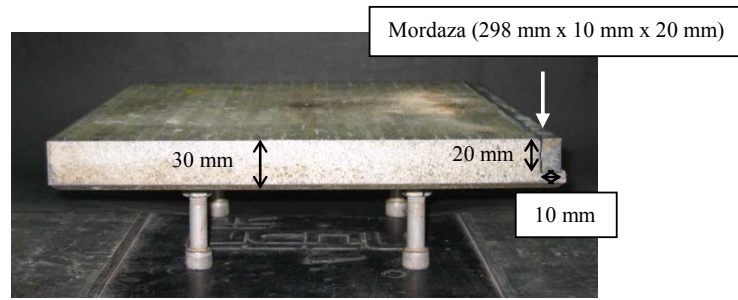


Figura 2.9 Vista lateral del soporte metálico inferior del geosintético

Tabla 2: Características técnicas de los aparatos de medida	
Descripción	Precisión
Anillo dinamométrico 100 kN con transductor LVDT LSC para mediciones electrónicas	Capacidad 1 a 100 kN Precisión $\pm 1\%$ Resolución lectura 0.002 mm Fondo escala LVDT 10 mm Precisión LVDT 0.002 mm
Transductor LVDT* ACT1000A/1012 Desplazamiento horizontal	Rango lineal ± 25 mm Sensibilidad 9.95 mV/mm Error linealidad 0.23% Temperatura 22°C
Transductor LVDT* LSC Desplazamiento vertical	Fondo escala 25 mm Sensibilidad 6.500 mV/V (V:2 a 10VDC) Error linealidad 0.04% Temperatura 20°C

* LVDT: Transformador diferencial variable lineal

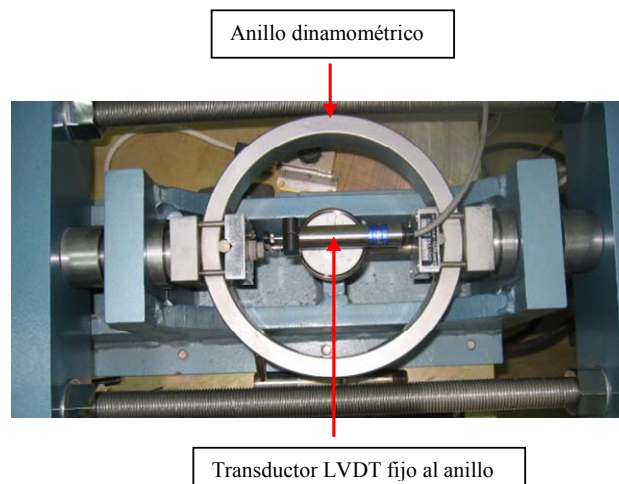


Figura 2.10 Instrumentos de medida

Apéndice B

Ensayos de laboratorio:

En este apéndice se presentan datos parciales de los resultados del programa de ensayos realizados en la presente investigación. Presentándose la totalidad de los resultados en los 8 informes semestrales entregados a la empresa CESPA del Grupo Ferrovial desde Febrero del 2005 hasta Julio del 2008.

Corte directo:

ENSAYOS PARA VASO DE VERTEDERO												
Geotextil/Geomembrana												
Condiciones secas					Condiciones húmedas							
N° test	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)			N° test	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)					
N°		100	300	450	N°		14	25	50	100	300	450
1	GT1/GM _{R1}	X	X	X	4	GT1/GM _{R1}	X	X	X	X	X	X
6	GT1/GM _{R2}	X	X	X	8	GT1/GM _{R2s1}	X	X	X	X	X	X
		Se hizo un ensayo multipunto			9	GT1/GM _{R2s2}	X	X	X	X	X	X
					12	GT1/GM _{R3}	X	X	X	X	X	X
					26	GT1/GM _{R4}				X	X	X
					11	GT1/GM _L	X	X	X	X	X	X
2	GT2/GM _{R1}	X	X	X	3	GT2/GM _{R1}	X	X	X	X	X	X
5	GT2/GM _{R2}	X	X	X	7	GT2/GM _{R2s1}	X	X	X	X	X	X
					10	GT2/GM _{R2s2}	X	X	X	X	X	X
					13	GT2/GM _{R3}	X	X	X	X	X	X
					27	GT2/GM _{R4}				X	X	X
					14	GT2/GM _L	X	X	X	X	X	X
					16	GT3/GM _{R1}	X	X	X	X	X	X
					17	GT3/GM _{R2s1}	X	X	X	X	X	X
					18	GT3/GM _{R2s2}	X	X	X	X	X	X
					19	GT3/GM _{R3}			X	X	X	
					28	GT3/GM _{R4}				X	X	X
					15	GT3/GM _L	X	X	X	X	X	X

ENSAYOS PARA VASO DE VERTEDERO									
GCL/Geocompuesto drenante									
Condiciones secas					Condiciones húmedas				
N° ensay	Tipo de interfaz	Tensión normal (kPa)			N° ensayo	Tipo de interfaz	Tensión normal (kPa)		
		100	300	500			100	300	500
49	GCL1nw/GC1(200)*	X	X	X	59	GCL1nw/GC2(300)	X	X	X
54	GCL1nw/GC2(300)**	X	X	X					

*GC1(200)=geocompuesto tipo 1 ensayado por la cara del geotextil de 200 g/m²

**GC2(300)=geocompuesto tipo 2 ensayado por la cara del geotextil de 300 g/m²

ENSAYOS PARA VASO DE VERTEDERO									
GCL/Geomembrana									
Condiciones secas					Condiciones húmedas				
N° ensayo	Tipo de interfaz	Tensión normal (kPa)			N° ensayo	Tipo de interfaz	Tensión normal (kPa)		
		100	300	500			100	300	500
45	GCL1nw*/GM _{R3} Ensayo a 50 kPa	X	X	X	53	GCL1nw/GM _{R3} Ensayo a 50 kPa	X	X	X
55	GCL1nw/GM _{R1}	X	X	X	46	GCL1nw/GM _L	X	X	X
44	GCL1nw/GM _L	X	X	X	51	GCL1 Ensayo a 200 kPa	X	X	X
52	GCL1 Ensayos a 150 y 200 kPa	X	X						
	Bentonita Ensayo a 200 kPa	X	X	X					

*GCL1nw=Geosynthetic Clay Liner ensayada por el lado del geotextil no tejido

Se realizó un ensayo con la GCL amordazada

ENSAYOS PARA VASO DE VERTEDERO					
Suelo/Geomembrana					
Condiciones húmedas					
N° ensayo	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)			
		100	300	500	
56	Suelo1/GM _{R1}	X	X	X	
43	Suelo1/GM _{R3}	X	X	X	
42	Suelo1/GM _L	X	X	X	
50	Suelo1	X	X	X	

ENSAYOS PARA SELLADO DE VERTEDERO						
Geocompuesto drenante/Geomembrana						
Condiciones secas						
N° ensayo	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)				
		25	50	100		
20	GC1(200)*GM _{R1}	X	X	X	X:200 kPa	
21	GC1(200)/GM _{R2s1}	X	X	X	X: 100 kPa Otra cara del geocompuesto	
22	GC1(200)/GM _{R2s2}	X	X	X		
23	GC1(200)/GM _{R3}	X	X	X	X: 75 kPa	
25	GC1(200)/GM _{R4}	X	X	X		
24	GC1(200)/GM _L		X	X	X:150 kPa	
36	GC1	X	X	X	X:350 y 500 kPa	
29	GC3(140)**GM _{R1}	X	X	X	X:100 kPa Efecto de la mordaza	
30	GC3(140)/GM _{R2s1}	X	X	X		
31	GC3(140)/GM _{R2s2}	X	X	X		
32	GC3(140)/GM _{R3}	X	X	X		
33	GC3(140)/GM _{R4}	X	X	X		
34	GC3(140)/GM _L		X	X	X: 150 kPa	
35	GC3	X	X	X		

*GC1(200)=geocompuesto tipo 1 ensayado por la cara del geotextil de 200 g/m²

**GC3(140)=geocompuesto tipo 3 ensayado por la cara del geotextil de 140 g/m²

ENSAYOS PARA SELLADO DE VERTEDERO									
Suelo/Geotextil					Suelo/Geotextile				
Condiciones secas					Condiciones húmedas				
N° ensayo	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)			N° ensayo	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)		
		25	50	100			25	50	100
37	Suelo1/GT4	X	X	X	40	Suelo1/GT4	X	X	X
38	Suelo1/GT5	X	X	X	39	Suelo1/GT5	X	X	X
57	Suelo2/GT4	X	X	X	41	Suelo1	X	X	X

ENSAYOS PARA SELLADO DE VERTEDERO					
Geocompuesto drenante/Geomalla					
Condiciones secas					
N° ensayo	Tipo interfaz	Tensión normal (kPa)			
		25	50	100	
47	GC1(200)*/GMalla1	X	X	X	
58	Suelo1/GMalla1/GC1(200)	X	X	X	
75	Suelo1/GMalla2/GC1(200)	X	X	X	

*GC1(200)=geocompuesto tipo 1 ensayado por la cara del geotextil de 200 g/m²

Ensayos de identificación de suelos

Tipo de ensayo	Suelo1	Suelo2	Bentonita
Granulometría	X	X	
Límites Atterberg	X	X	X
Peso específico de partículas	X		X

Ensayos de compactación

Tipo de ensayo	Suelo1	Suelo2
Proctor normal	X	X
Proctor modificado	X	X

Ensayos de identificación química de la bentonita

Ensayo de análisis de la composición química de la bentonita1 y bentonita2: Fluorescencia de Rayos X, gráfica intensidad frente ángulo de Bragg, y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.

Ensayos edométricos de la bentonita

Condiciones saturadas		
Tipo bentonita	Humedad inicial	
Bentonita	Edómetro1: $0.9W_L$ (Límite líquido)	Edómetro2: $1.9W_L$ (Límite líquido)

Ensayos triaxiales de la bentonita

Condiciones saturadas			
Tipo bentonita	Tensión normal (kPa)		
	50	150	300
Bentonita	X	X	X

Ensayos corte simple de la bentonita

Condiciones saturadas			
Tipo bentonita	Tensión normal (kPa)		
	50	100	300
Bentonita	X	X	X

TIPOS DE MUESTRAS:

DENOMINACIÓN	TIPO
GM (Geomembrana)	GM _{R1} rugosa tipo 1 GM _{R2s1} rugosa tipo 2 cara 1 GM _{R2s2} rugosa tipo 2 cara 2 GM _{R3} rugosa tipo 3 GM _{R4} rugosa tipo 4 GM _L lisa
GT (Geotextil)	GT1 no tejido agujeteado monofilamento GT2 no tejido termofundido monofilamento GT3 no tejido agujeteado tipo fibra corta GT4 no tejido termofundido monofilamento GT5 no tejido agujeteado fibra larga
GCL (Gesynthetic Clay Liner)	GCL1w cara geotextil tejido GCL1nw cara geotextil no tejido
GC (Geocompuesto drenante)	GC1 tipo 1 GC2 tipo 2 GC3 tipo 3
Geomalla	GMalla1 tipo 1 GMalla2 tipo 2
Suelos	Suelo1 vertedero 1 Suelo2 vertedero 2 Bentonita sódica

DESCRIPCIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS:

Geomembranas:

GM_{R1}: geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) rugosa por las dos caras. Fabricada en dos pasos: extrusión de la geomembrana lisa y proyectado del polietileno fundido. Espesor 1.5 mm.

GM_{R2}: geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) rugosa por las dos caras. Fabricada por extrusión. Espesor 1.5 mm.

GM_{R3}: geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) rugosa por las dos caras. Fabricada por laminación. Espesor 1.5 mm.

GM_{R4}: geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) rugosa por las dos caras. Fabricada por extrusión. Espesor 1.5 mm.

GM_L: geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) lisa por las dos caras. Espesor 1.5 mm.

Geotextiles:

GT1: geotextil no tejido de filamento continuo de 100% polipropileno agujeteado. Masa por unidad de área 500 gr/m².

GT2: geotextil no tejido de filamento continuo 70% polipropileno y 30% polietileno unido térmicamente. Masa por unidad de área 335 g/m².

GT3: geotextil no tejido de fibra corta de 100% polipropileno agujeteado. Masa por unidad de área 500 gr/m².

GT4: geotextil no tejido de filamento continuo 70% polipropileno y 30% polietileno unido térmicamente. Masa por unidad de área 160 gr/m².

GT5: geotextil no tejido de fibra corta de 100% polipropileno agujeteado. Masa por unidad de área 150 gr/m².

Geosynthetic Clay Liner:

GCL: Geosynthetic Clay Liner con fibras de refuerzo mediante un agujeteado continuo a través de todos sus componentes.

Geocompuestos drenantes:

GC1: geocompuesto drenante constituido por una geored con dos geotextiles no tejidos termofijados a la geored. La geored está formada por dos hilos superpuestos.

GC2: geocompuesto drenante constituido por una geored de polietileno de alta densidad (PEAD) con dos geotextiles de polipropileno (PP) termofijados a la geored. La geored está formada por dos hilos superpuestos.

GC3: geocompuesto drenante constituido por una geored con dos geotextiles no tejidos termofijados a la geored. La geored está formada por dos hilos superpuestos.

Geomallas:

GMalla1: geomalla constituida por barras poliméricas entrelazadas unidas mediante soldadura.

GMalla2: geomalla flexible fabricada a partir de hilos sintéticos de módulo elástico alto y provistos de un revestimiento de protección polimérico.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS:

Suelo1	Arena arcillosa
Granulometría	95 % suelo fino 5 % suelo grueso
Límite líquido, W_L	45.43 %
Índice de plasticidad, IP	21.28 %
Peso específica partícula, γ_s	26.6 kN/m ³
Compactación Proctor Normal	
Densidad máxima	17.4 kN/m ³
Humedad óptima	17.50 %
Compactación Proctor Modificado	
Densidad máxima	19.2 kN/m ³
Humedad óptima	12 %

Suelo2	Arena arcillosa
Granulometría	85 % suelo fino 15 % suelo grueso
Límite líquido, W_L	37.15 %
Índice de plasticidad, IP	16.9 %
Peso específica partícula, γ_s	26.6 kN/m ³
Compactación Proctor Normal	
Densidad máxima	18.6 kN/m ³
Humedad óptima	13.21 %
Compactación Proctor Modificado	
Densidad máxima	20.6 kN/m ³
Humedad óptima	8.5 %

ENSAYOS DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 1

Fecha: 03/02/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

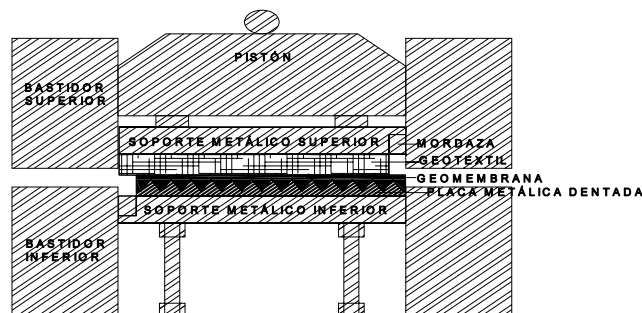
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

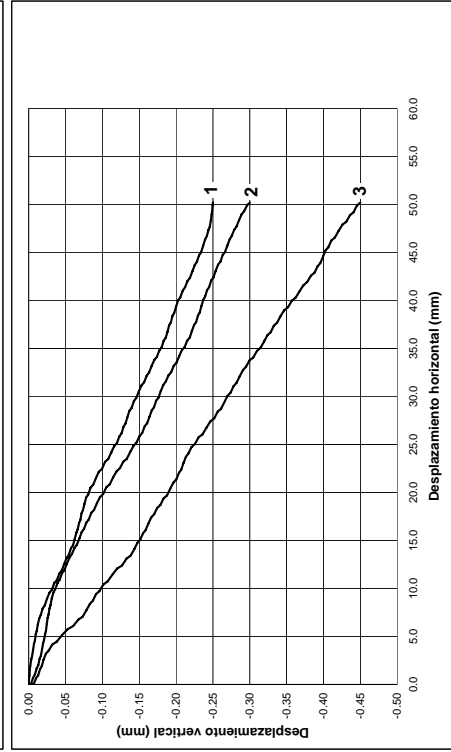
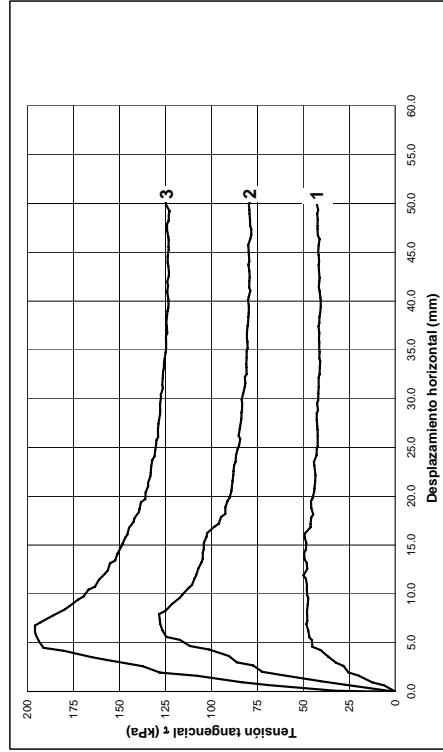
Ensayo N°: 1

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

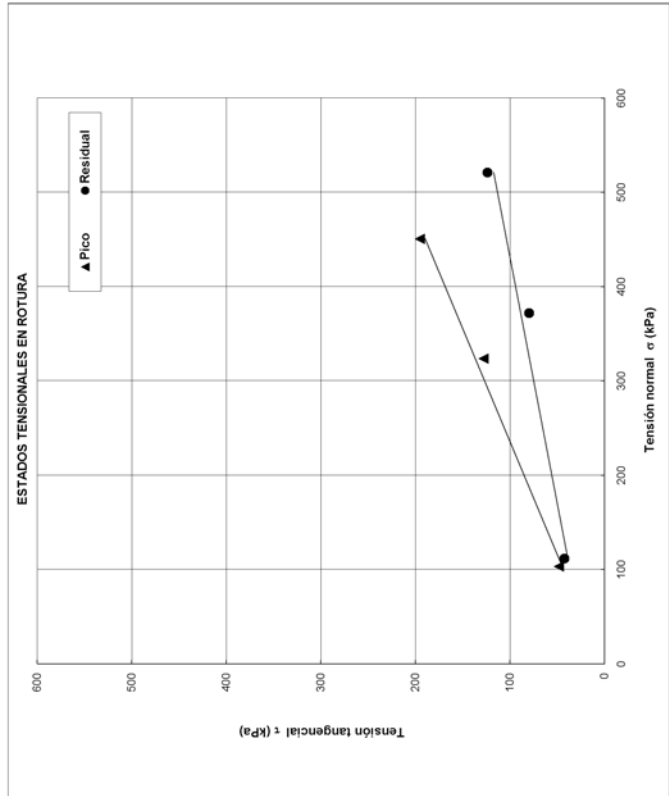
Ensayo N°: 1

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		
T. lang. de pico σ_p (kPa)	48.30	127.81	196.30		
T. lang. residual τ_r (kPa)	42.32	79.51	123.54		
Geosintético superior	GT	GT	GT		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	4.0	4.0	4.0		
Humedad inicial, w _i (%)					
Humedad final, w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500.0	500.0	500.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Humedad inicial, w _i (%)					
Humedad final, w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 2

Fecha: 08/02/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

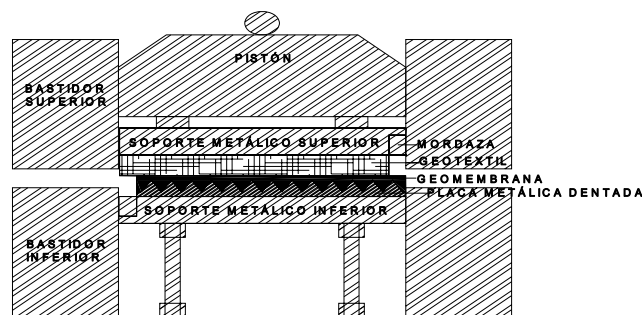
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:

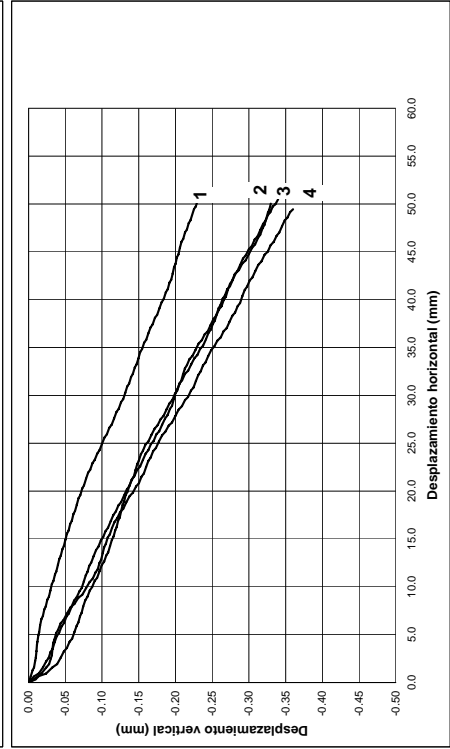
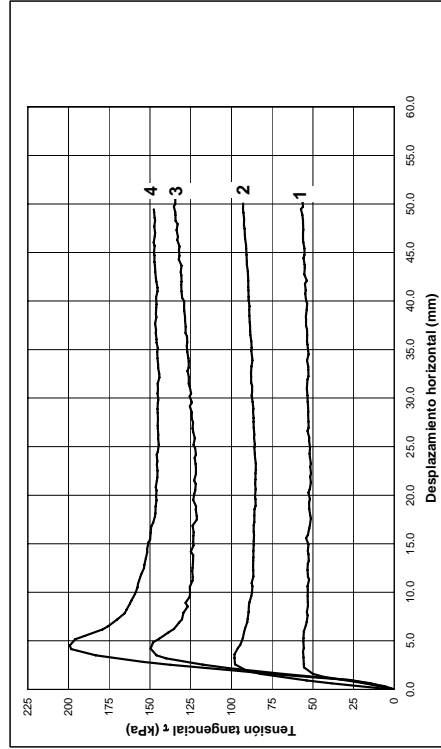


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:2

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	400

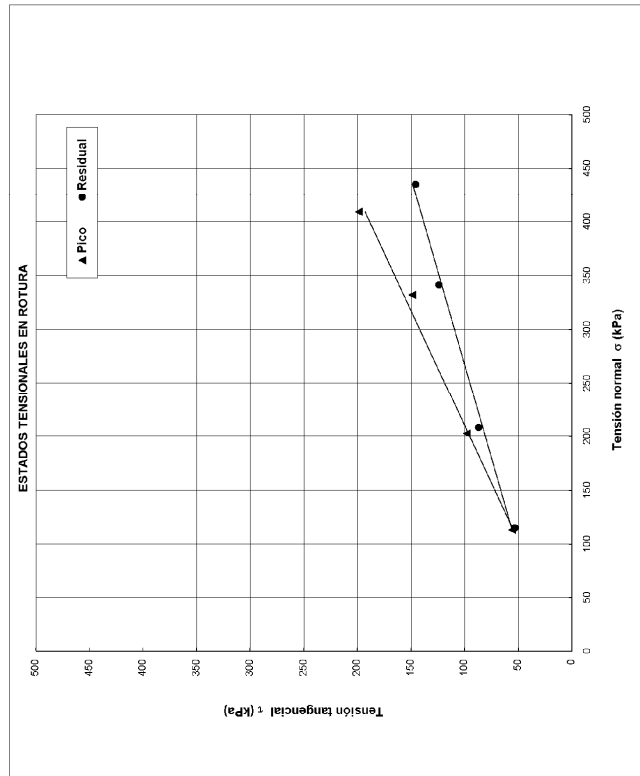


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:2

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	31
Tensión normal σ (kPa)	100	200	300	400	300
Tamaño de pico σ (kPa)	55.70	97.97	148.82	198.78	95.88
Tamaño residual σ (kPa)	55.05	86.74	123.88	145.63	47.70
Geosintético superior	GT	GT	GT	GT	GT
Lado L (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espesor, t (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	300.0
Humedad inicial, w(%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Humedad final, w(%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	335.0	335.0	335.0	335.0	335.0
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espesor, t (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	300.0
Humedad inicial, w(%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Humedad final, w(%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)					
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 3

Fecha: 15/02/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

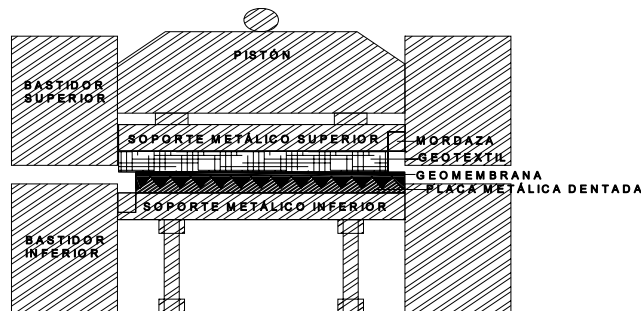
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:3

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

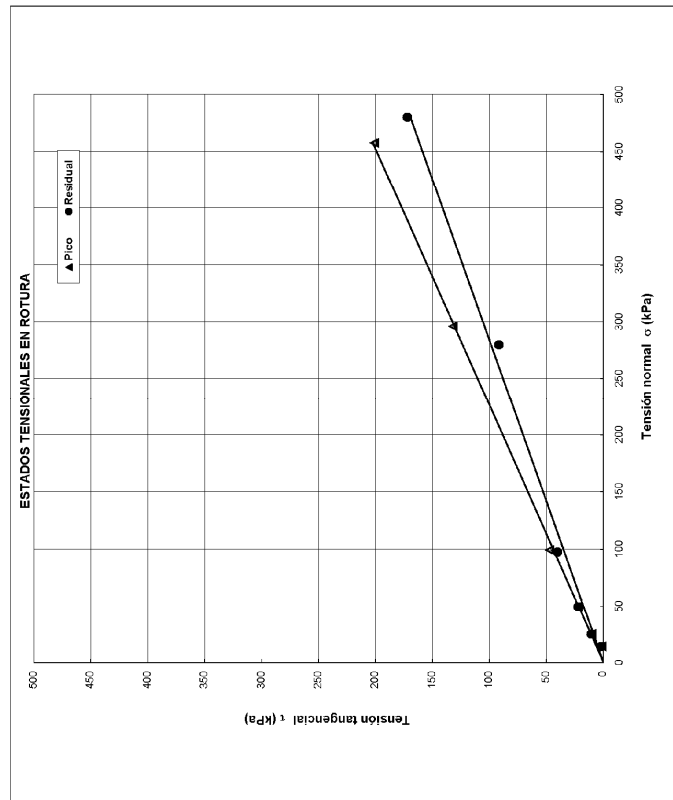
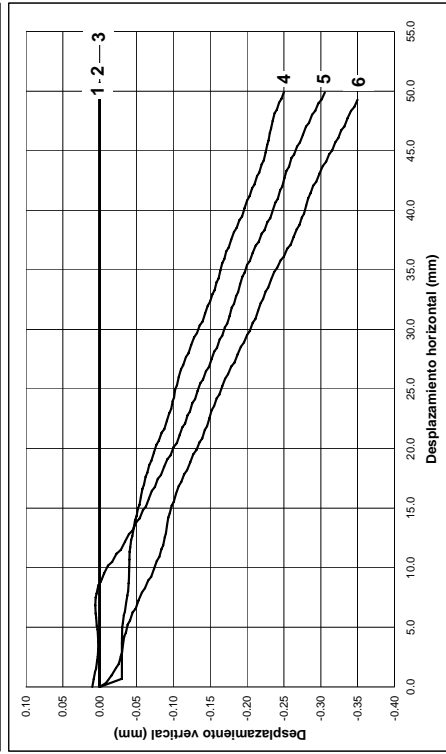
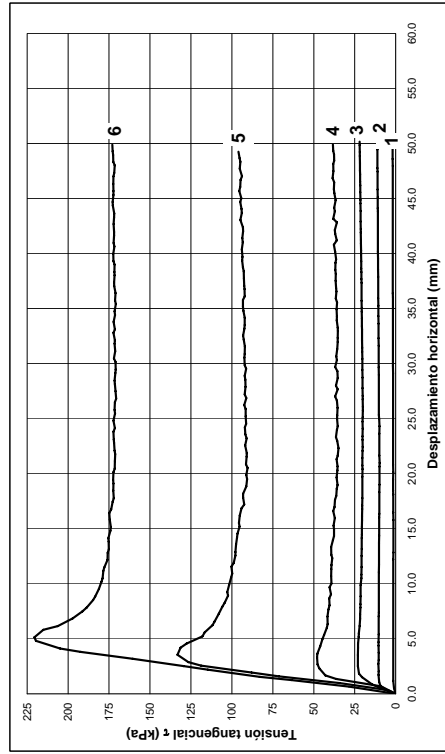
TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico τ_p (kPa)	150	162	223	4723	13226	20149
T. tang. residual τ_r (kPa)	149	162	223	4632	9149	1196
Geotextilico superior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L (mm)	300	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Espesor E (mm)	282	282,0	282,0	282,0	282,0	282,0
Módulo de elasticidad E (kN/m ²)	1,5	235,0	335,0	335,0	335,0	335,0
Módulo de elasticidad de fibra E_f (kN/m ²)	385	335,0	335,0	335,0	335,0	335,0
V. de ensayo (mm/min)	5	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Geotextilico inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L (mm)	300	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Espesor E (mm)	282	282,0	282,0	282,0	282,0	282,0
Masa por unidad de área m (g/m ²)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
V. de ensayo (mm/min)	5	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 4

Fecha: 16/02/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

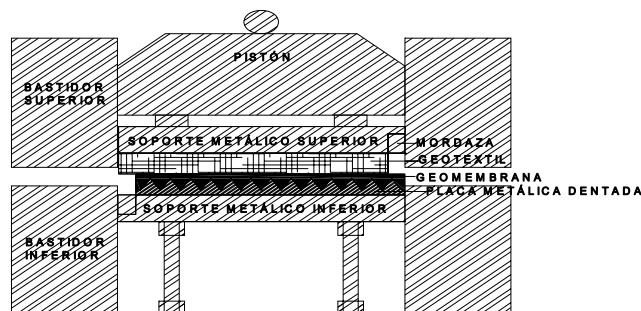
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

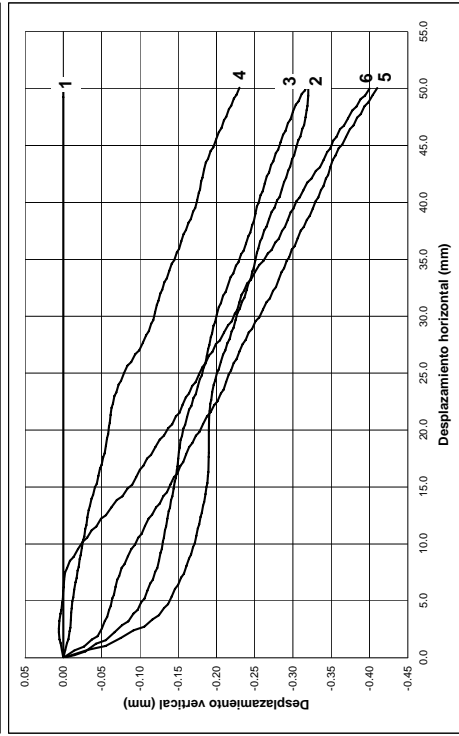
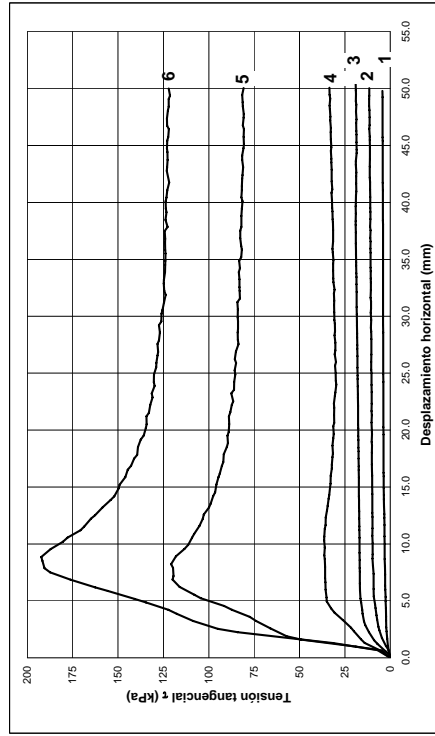
Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:4

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana	TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO					
Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450

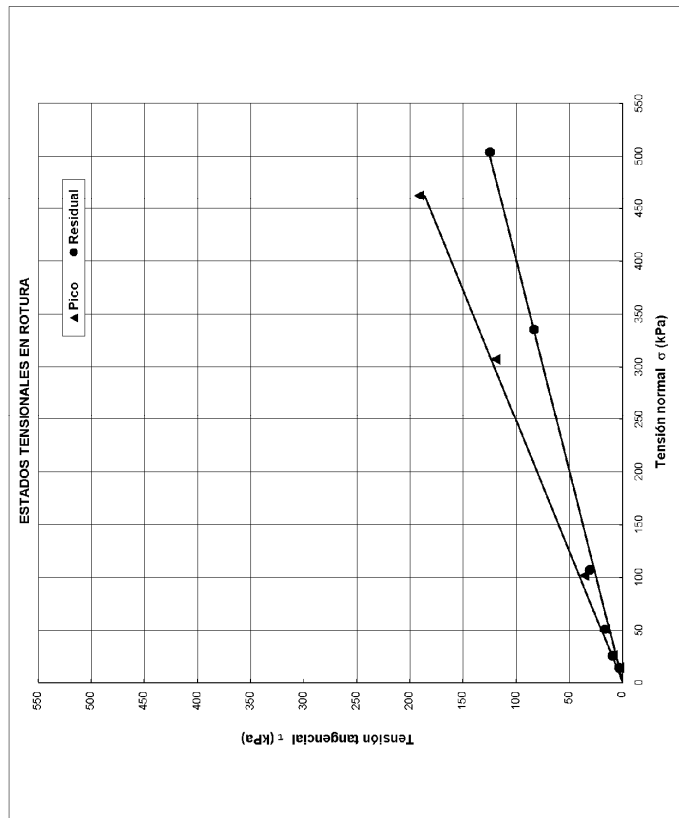


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:4

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana	TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO					
--------------------------------	---------------------------	--	--	--	--	--

Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico t_p (kPa)	3.14	9.47	16.62	35.96	119.60	191.53
T. tang. residual t_r (kPa)	3.14	9.47	16.62	30.67	83.27	124.63
Geosintético superior	GT	GT	GT	GT	GT	GT
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
V. de ensayo (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 5

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

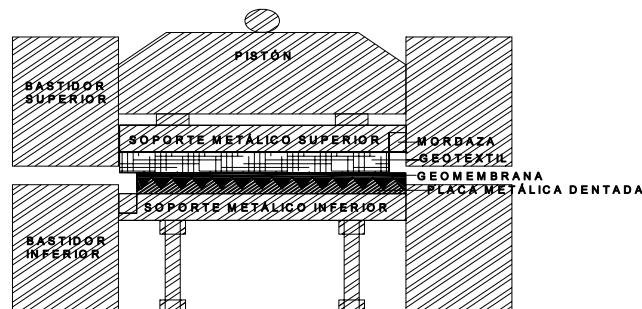
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:

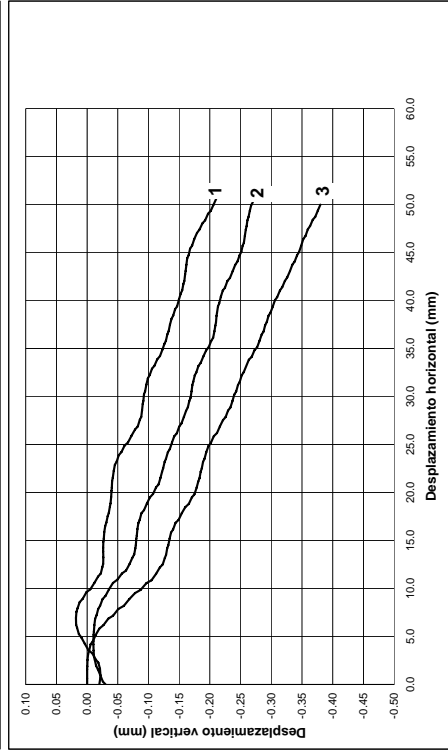
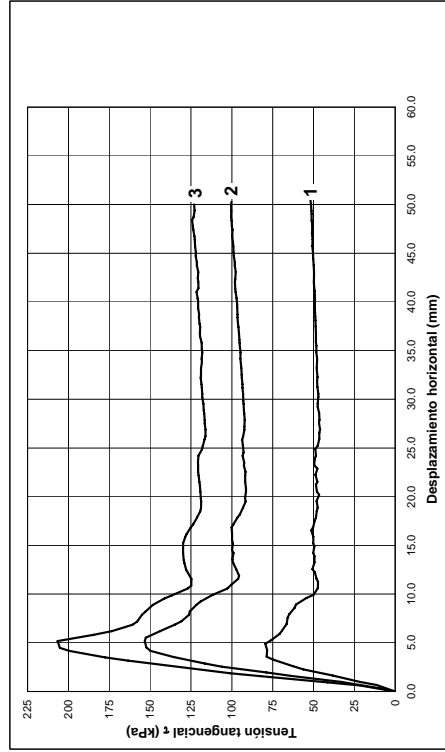


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:5

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		

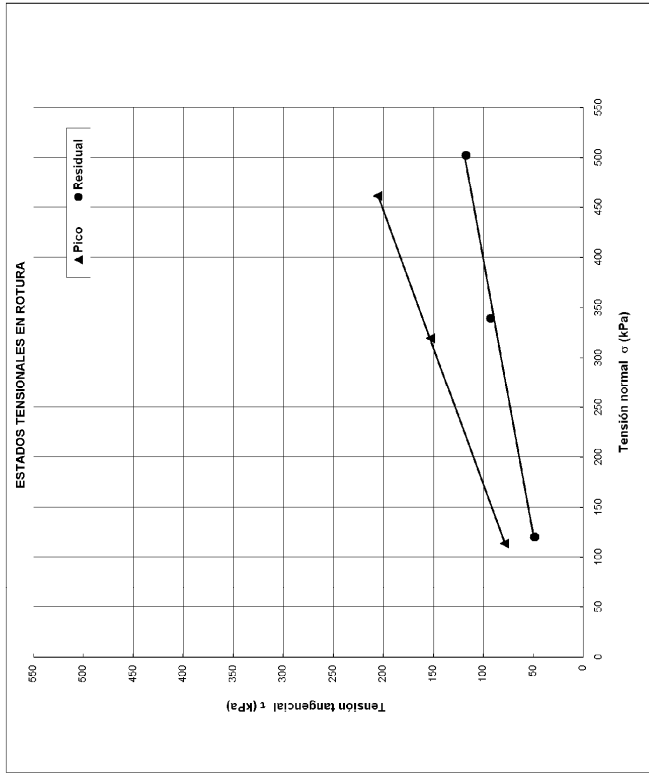


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:5

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		
T. líq. de pico τ_p (kPa)	78.88	162.77	206.88		
T. líq. residual τ_r (kPa)	48.30	92.36	117.13		
Geosintético superior	GT	GT	GT		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Humedad inicial, w _i (%)					
Humedad final, w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	335.0	335.0	335.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Humedad inicial, w _i (%)					
Humedad final, w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)					
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 6

Fecha: 21/12/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

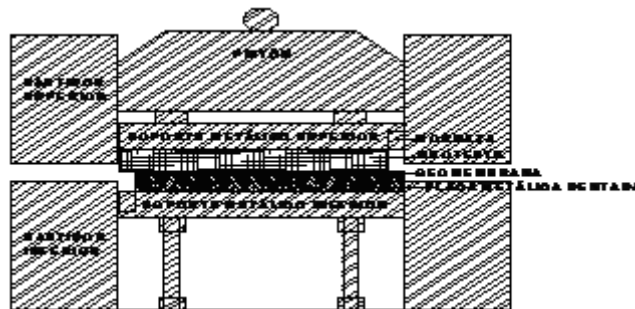
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



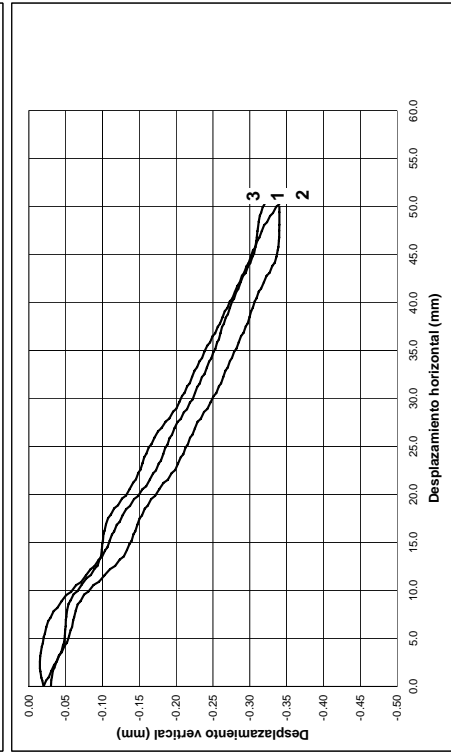
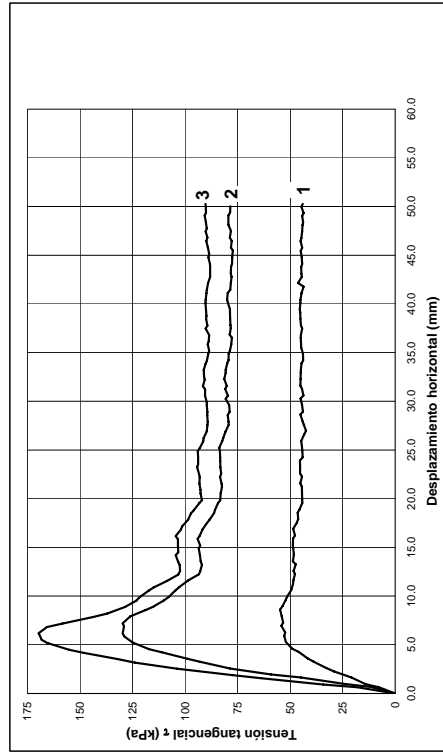
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo N°:6

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	450		



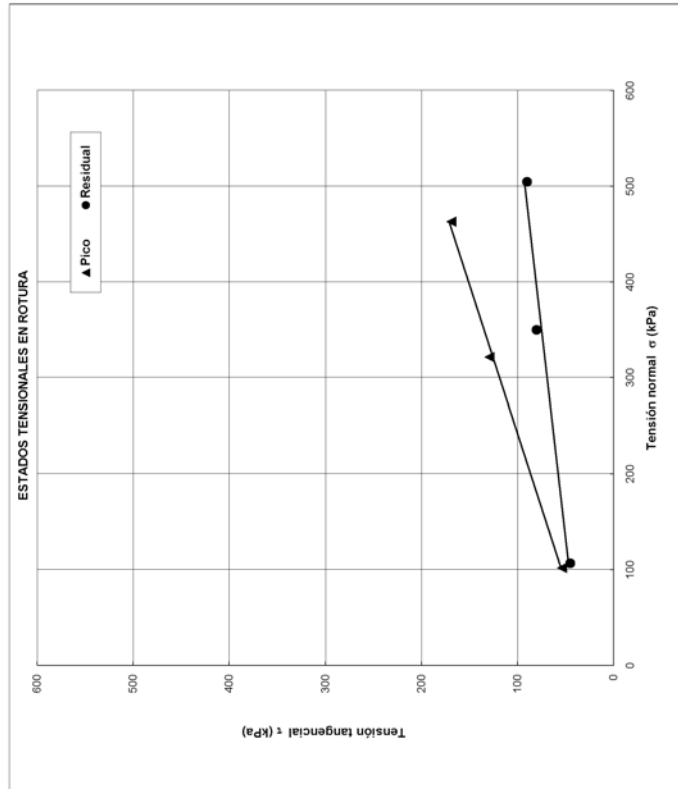
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:6

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	450			
T. tang. de pico τ_p (kPa)	53.60	129.41	169.02			
T. tang. residual τ_r (kPa)	45.06	80.00	90.00			
Geosintético superior	GT	GT	GT			
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0			
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0			
Espesor, t (mm)	4.0	4.0	4.0			
Humedad inicial, w_i (%)						
Humedad final, w_f (%)						
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500.0	500.0	500.0			
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000			
Geosintético inferior	GM	GM	GM			
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0			
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0			
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5			
Humedad inicial, w_i (%)						
Humedad final, w_f (%)						
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000			
V. de ensayo (mm/min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 7

Fecha: 22/02/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

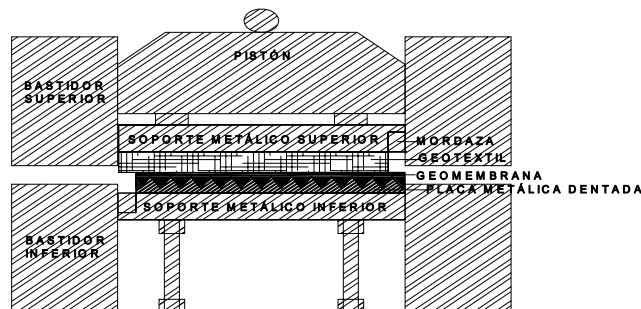
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

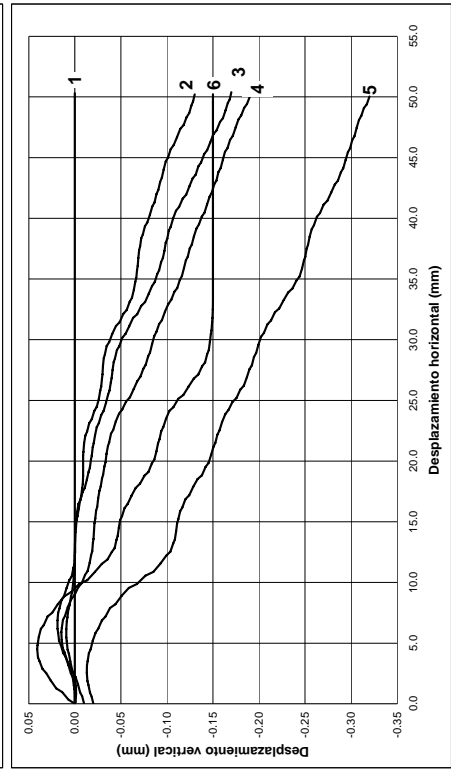
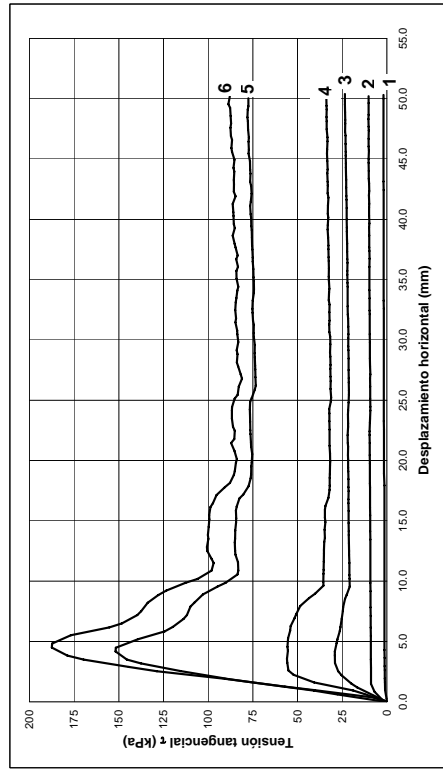
ASTM D5321-02

Ensayo Nº:7

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

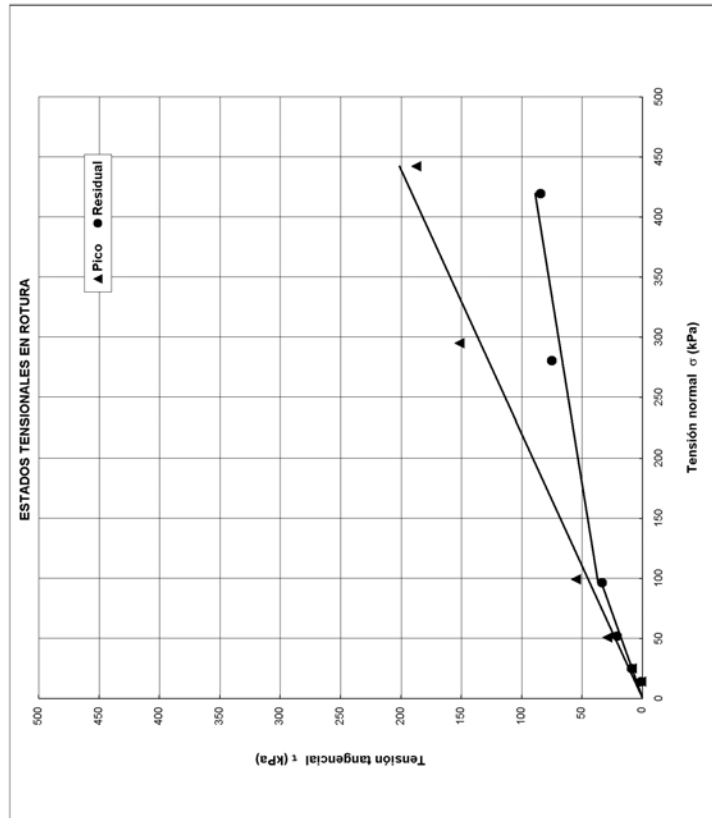
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:7

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico, τ_c (kPa)	1.28	8.88	29.07	55.13	151.70	187.41
T. tang. residual, τ_r (kPa)	1.28	8.88	21.12	33.51	75.16	84.43
Geosintético superior						
Lado L, (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L, (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, l (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	335	335.0	335.0	335.0	335.0	335.0
V. de ensayo, (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior						
Lado L, (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L, (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, l (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo, (mm/min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 8

Fecha: 23/02/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

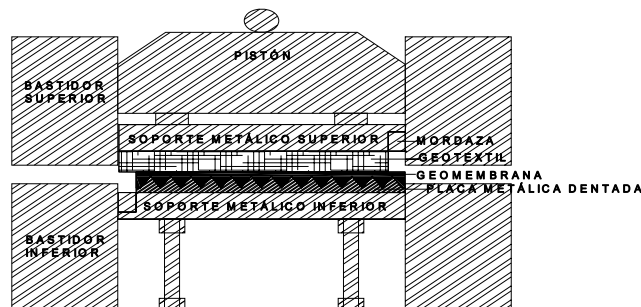
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:8

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

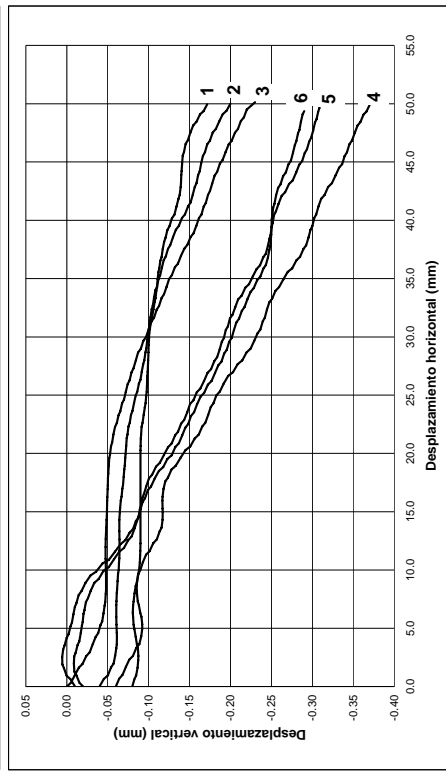
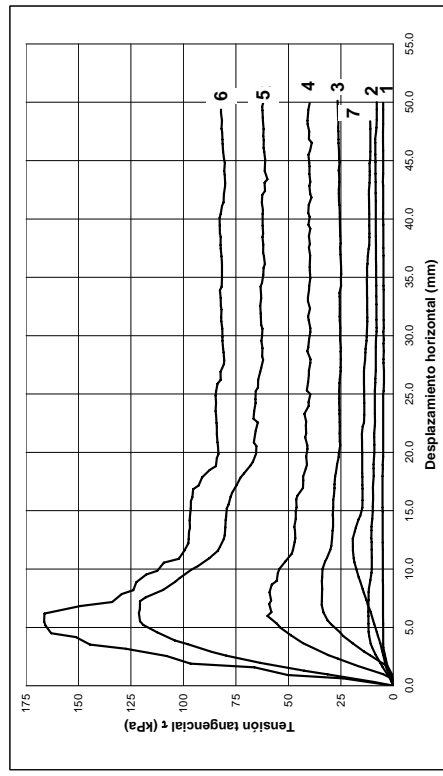
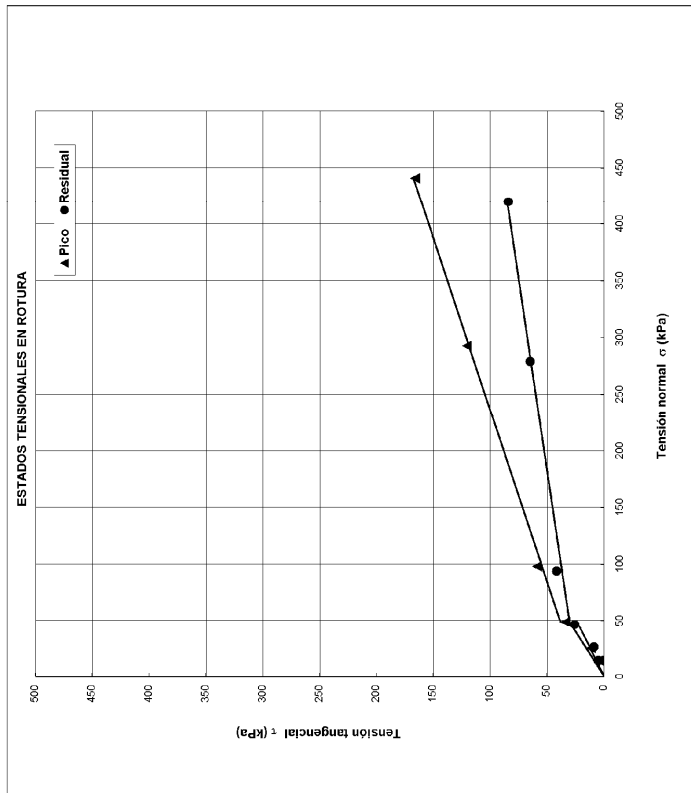
TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico τ (kPa)	4.92	11.79	33.96	58.72	120.48	166.12
T. tang. residual τ_r (kPa)	4.92	8.87	25.80	41.54	64.95	84.14
Geosintético superior						
Lado L_1 (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espesor, t (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Geosintético inferior						
Lado L_1 (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espesor, t (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
V de ensayo (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 9

Fecha: 28/03/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S2}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 2

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

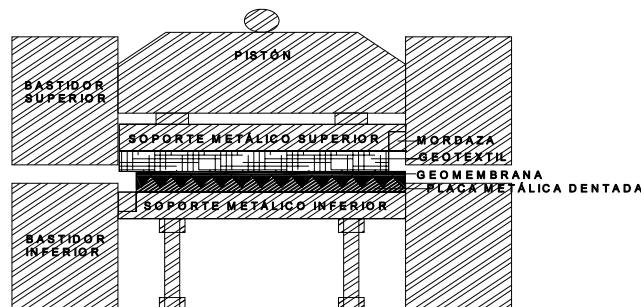
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

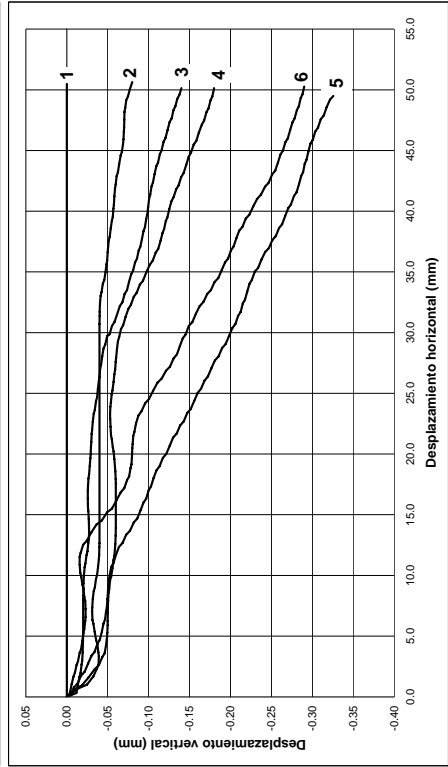
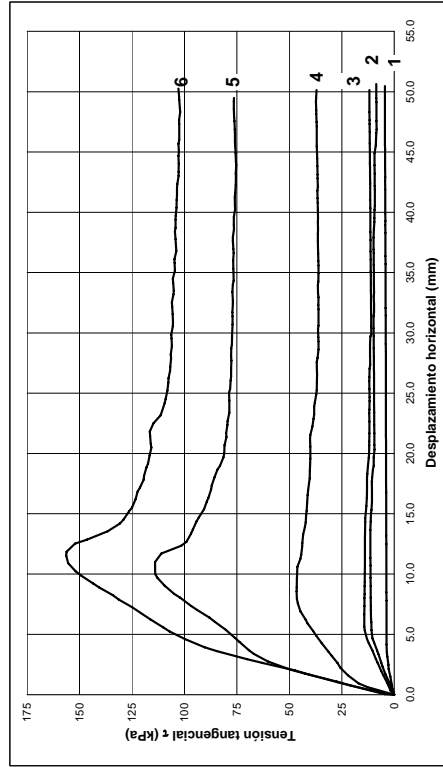
Ensayo Nº:9

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

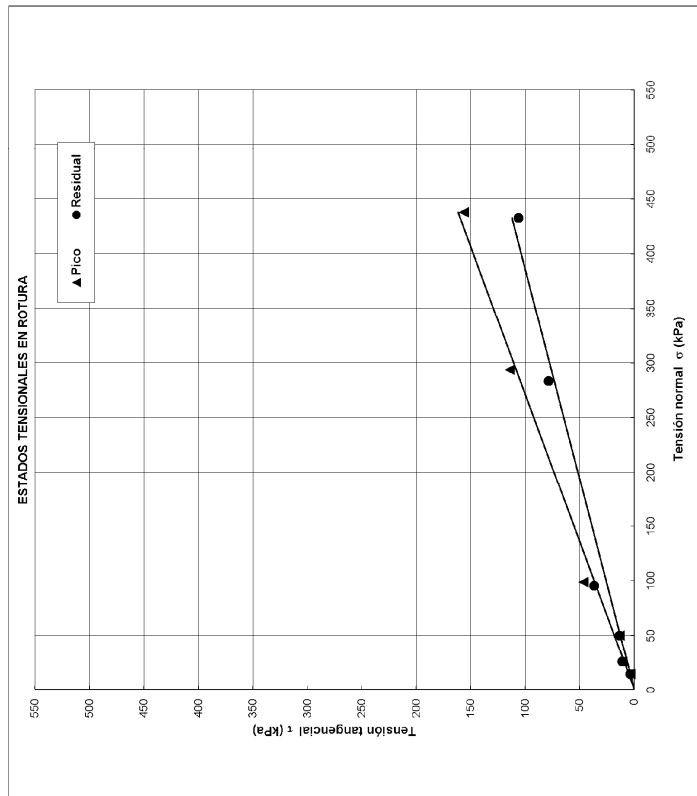
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:9

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	3.67	10.92	13.58	46.38	114.00	156.31
T. tang. residual, τ_r (kPa)	3.67	10.92	13.58	36.75	78.48	106.13
Geométrico superior	GT	GT	GT	GT	GT	GT
Lado, L_x (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L_y (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
V. de ensayo (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geométrico inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado, L_x (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L_y (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 10

Fecha: 31/03/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S2}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 2

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

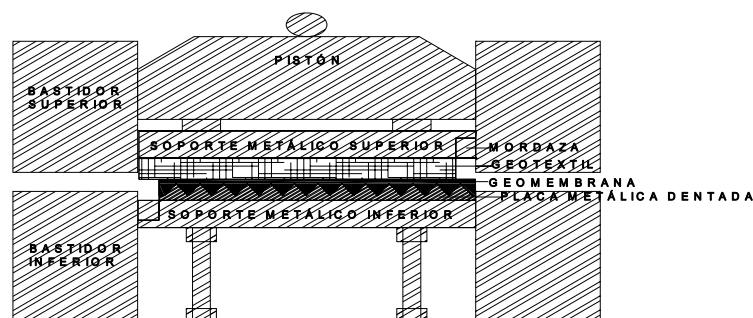
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

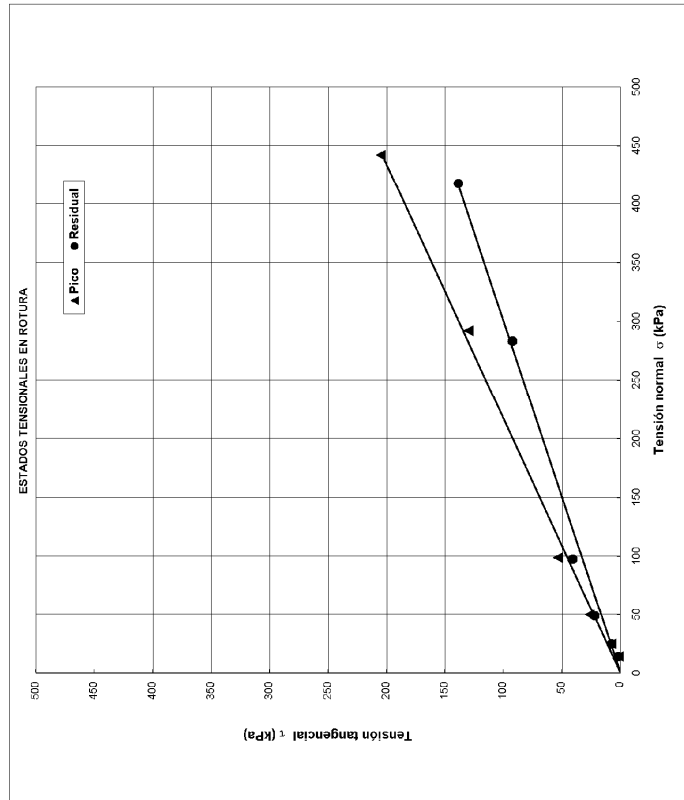
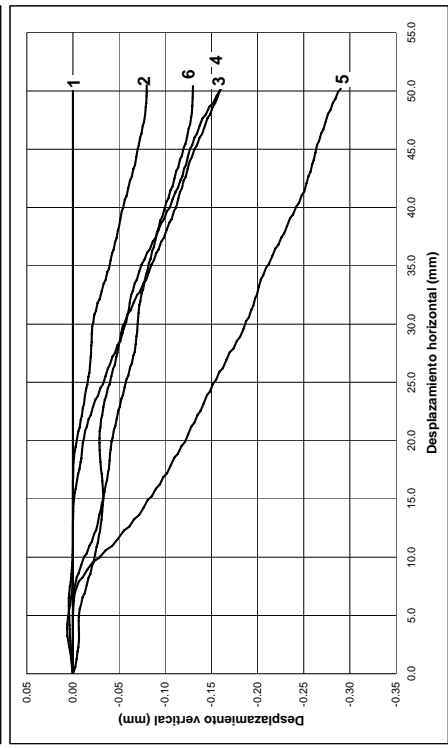
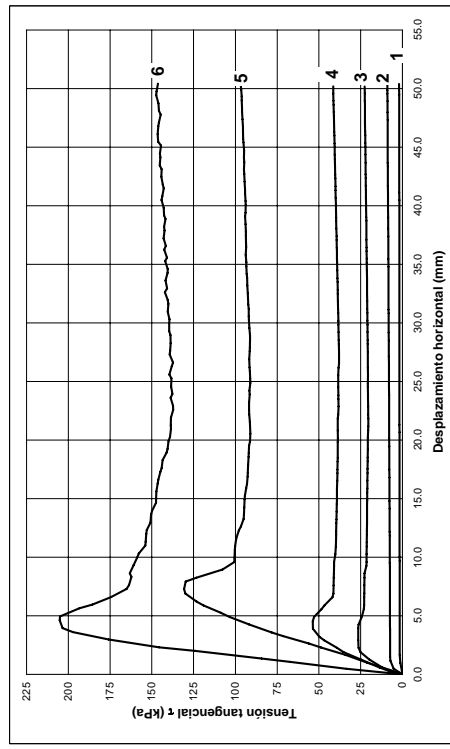
Ensayo Nº: 10

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico τ_p (kPa)	1.66	7.44	25.38	53.36	157.12	265.98
T. tang. residual τ_r (kPa)	1.66	7.44	21.86	46.53	127.00	193.59
Geosintético superior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m ₁ (g/m ²)	335	335.0	335.0	335.0	335.0	335.0
Masa por unidad de área, m ₂ (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m ₁ (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Masa por unidad de área, m ₂ (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000

TIPO DE ENSAYO:	SUMERGIDO					
MUESTRA:	Geotextil/Geomembrana					
Ensayo Nº:	10					
Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 11

Fecha: 18/04/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

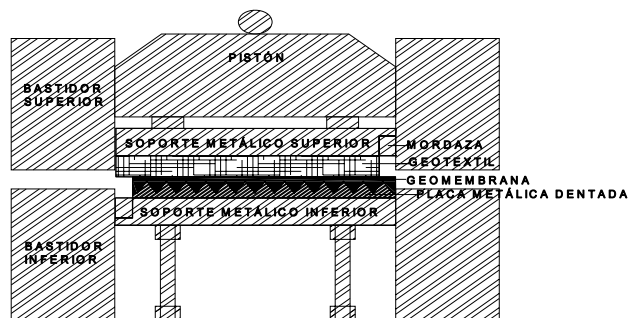
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

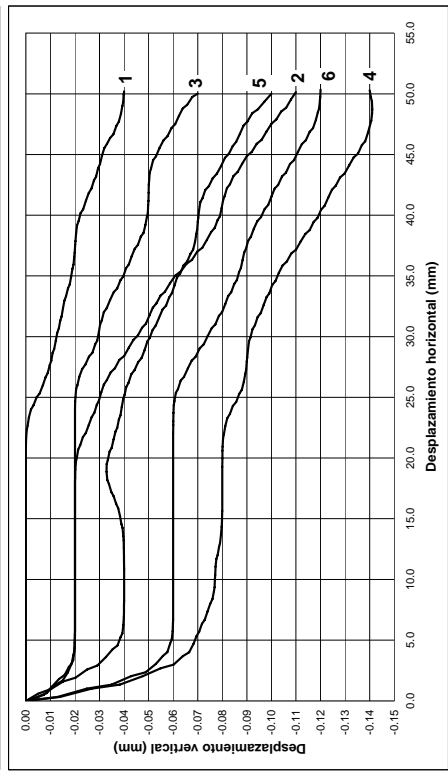
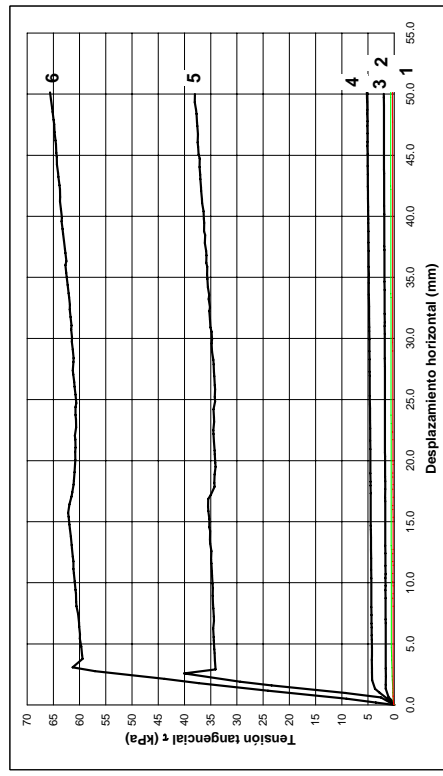
Ensayo Nº: 11

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

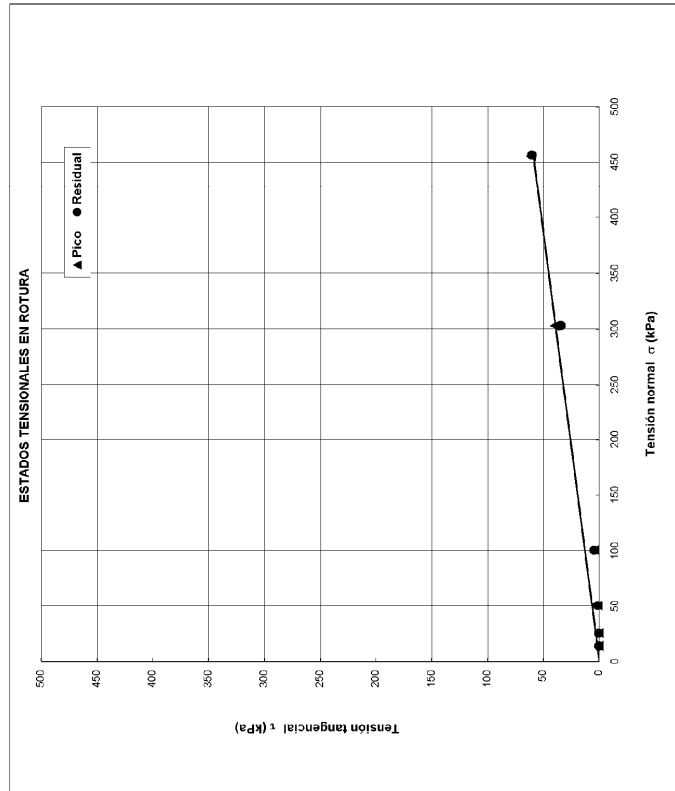
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 11

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico, τ (kPa)	0.22	0.57	1.63	4.28	40.04	61.32
T. tang. residual, τ (kPa)	0.22	0.57	1.63	4.28	34.42	60.19
Geosintético superior						
Lado, L _i (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espeesor, l (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
V. de ensayo (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior						
Lado, L _i (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espeesor, l (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
V. de ensayo (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 12

Fecha: 20/04/2006 (el ensayo multipunto se realizó el 15/10/2007)

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

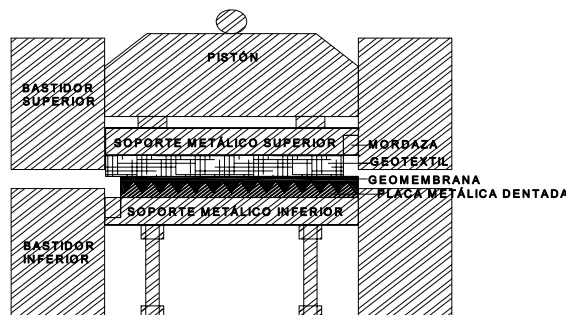
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 12

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

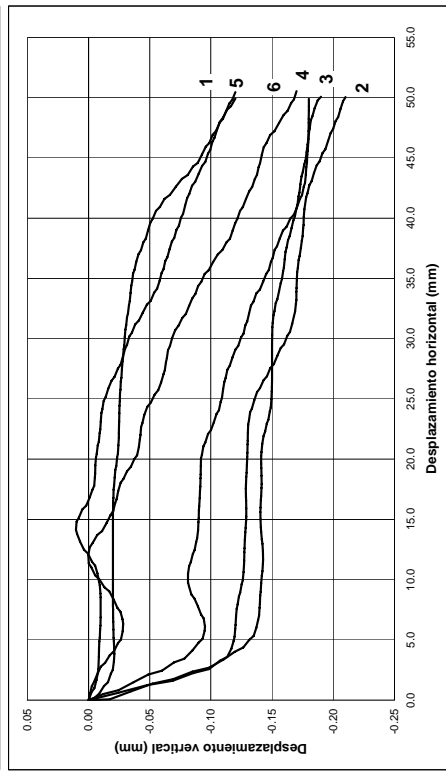
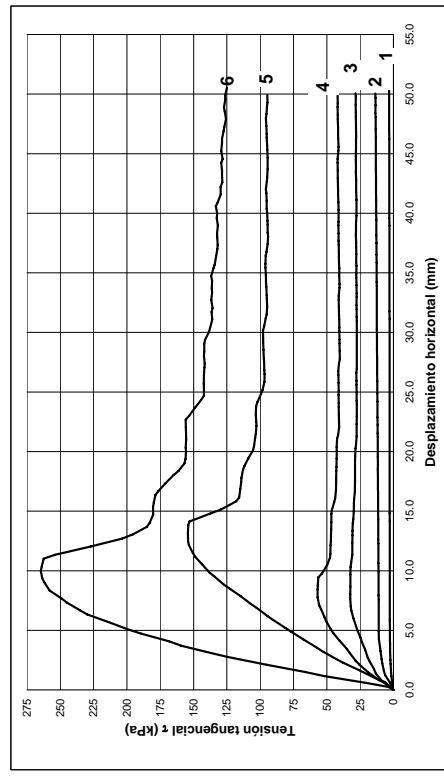
TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tang. de pico τ_p (kPa)	2.50	10.96	31.86	56.63	153.90	263.66
T. tang. residual τ_r (kPa)	2.50	10.96	31.86	41.17	96.65	138.88
Geosintético superior						
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor L ₃ (mm)	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
V. de ensayo (mm ³ /min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior						
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor L ₃ (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm ³ /min)						

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



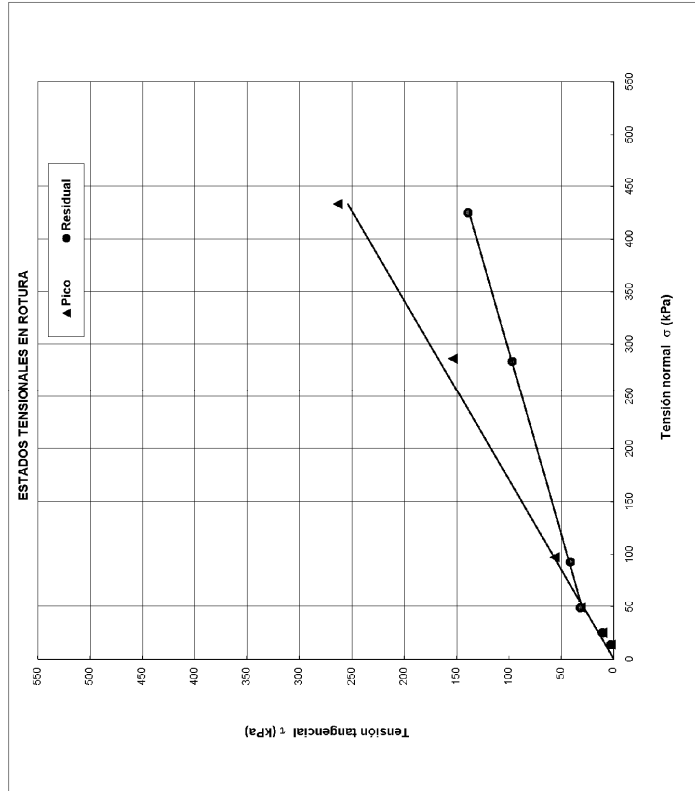
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 12

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO



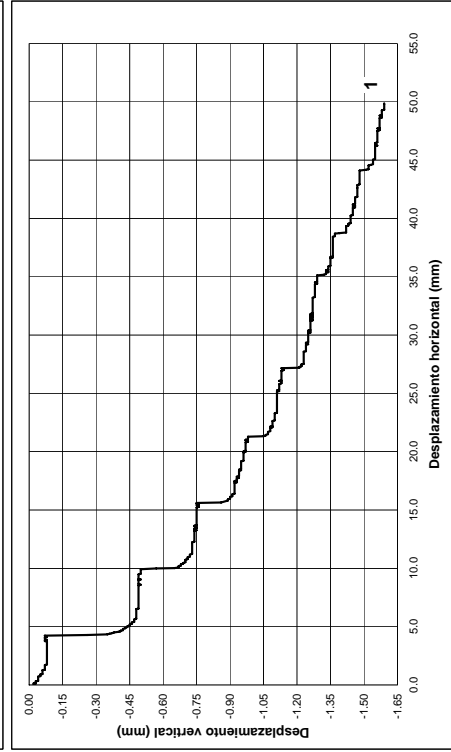
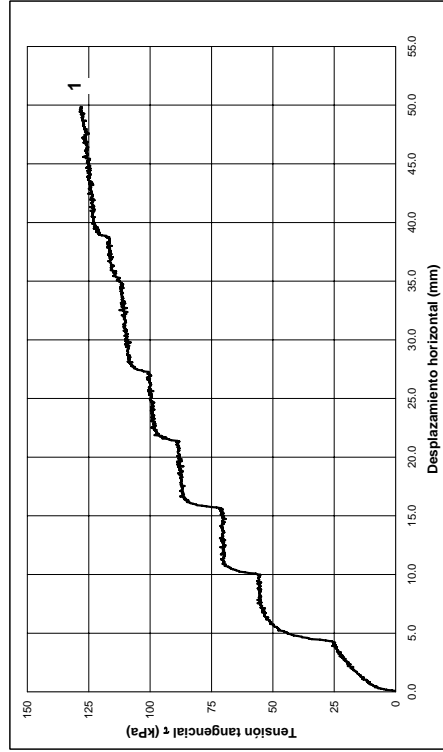
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:12 Multipunto

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	Varías				



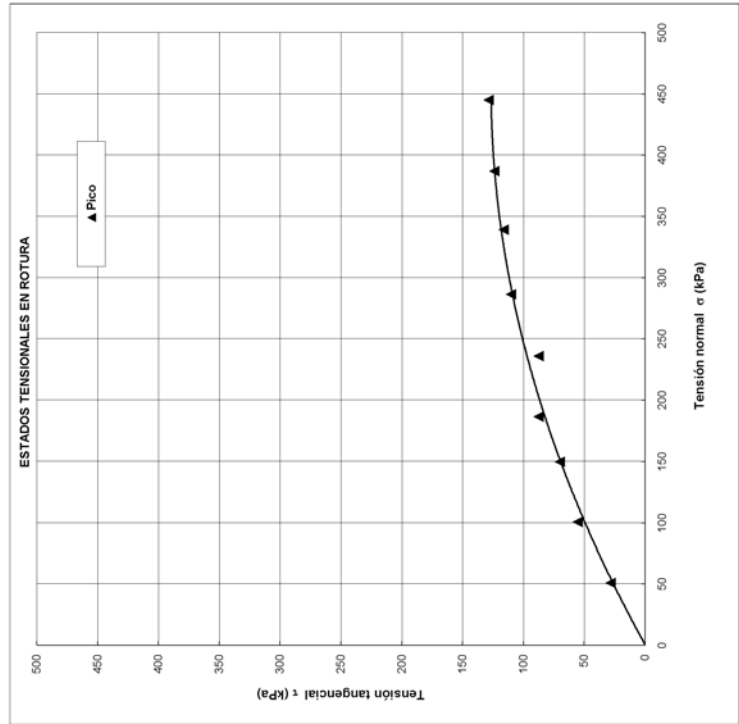
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:12 Multipunto

MUESTRA : Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	Varías				
T. tang. de pico τ_p (kPa)	0,104				
T. tang. residual τ_r (kPa)	GT				
V. de ensayo (mm/min)	300,0				
Geométrico superior	282,0				
Lado L ₁ (mm)	4,0				
Lado L ₂ (mm)	500,0				
Espesor t (mm)	GM				
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	300,0				
Geométrico inferior	282,0				
Lado L ₁ (mm)	1,5				
Lado L ₂ (mm)					
Espesor t (mm)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 13

Fecha: 28/04/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

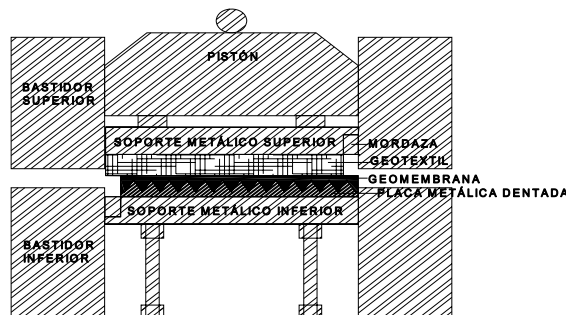
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



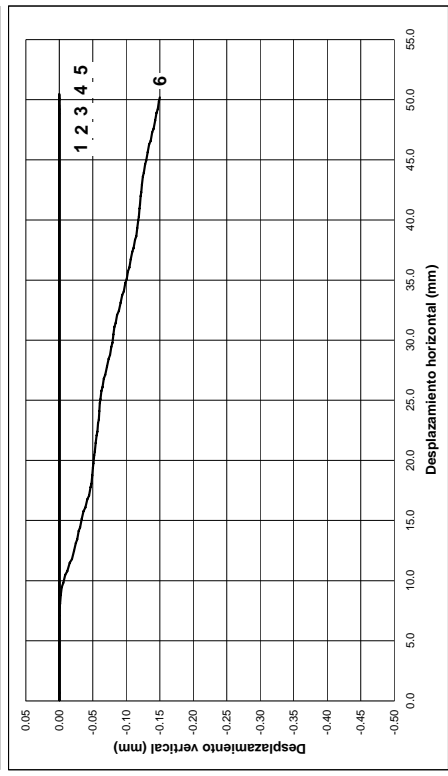
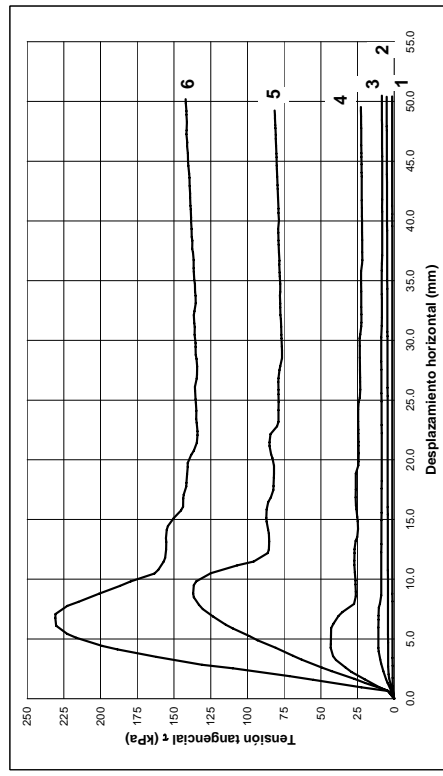
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 13

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



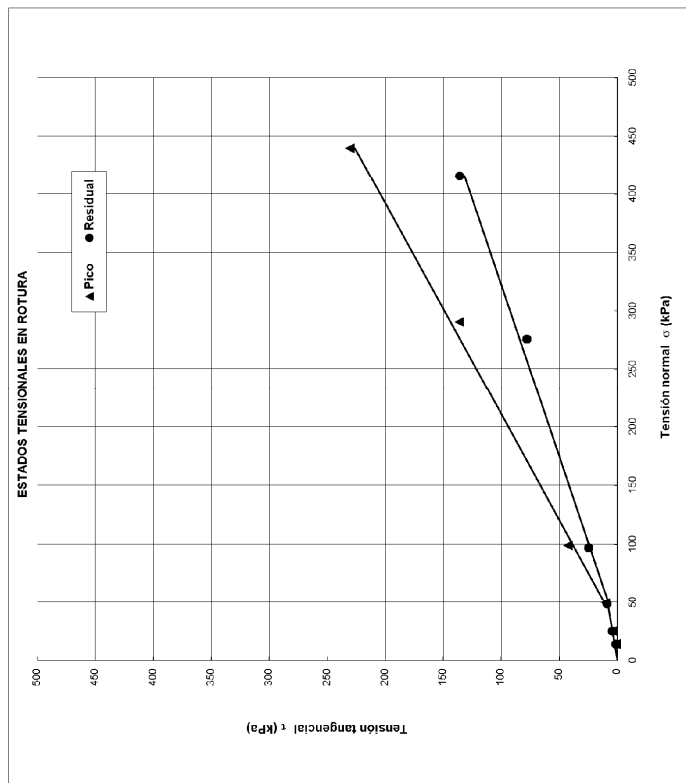
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D6321-02)

Ensayo Nº: 13

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. base de pico σ_p (kPa)	125	4.32	10.44	42.60	135.23	230.56
T. base residual σ_r (kPa)	125	4.32	8.71	24.57	77.90	135.80
Geosintético superior	GT	GT	GT	GT	GT	GT
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, L (mm)	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
V. de ensayo (mm ³ /min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, L (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm ³ /min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 14

Fecha: 03/05/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

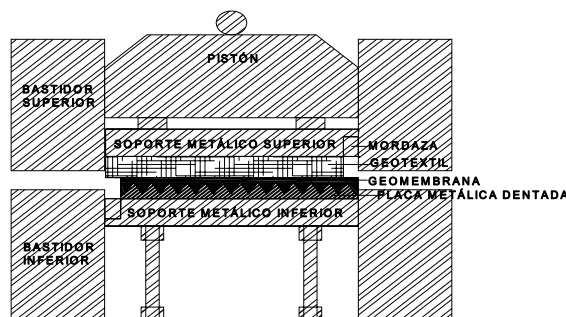
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 14

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

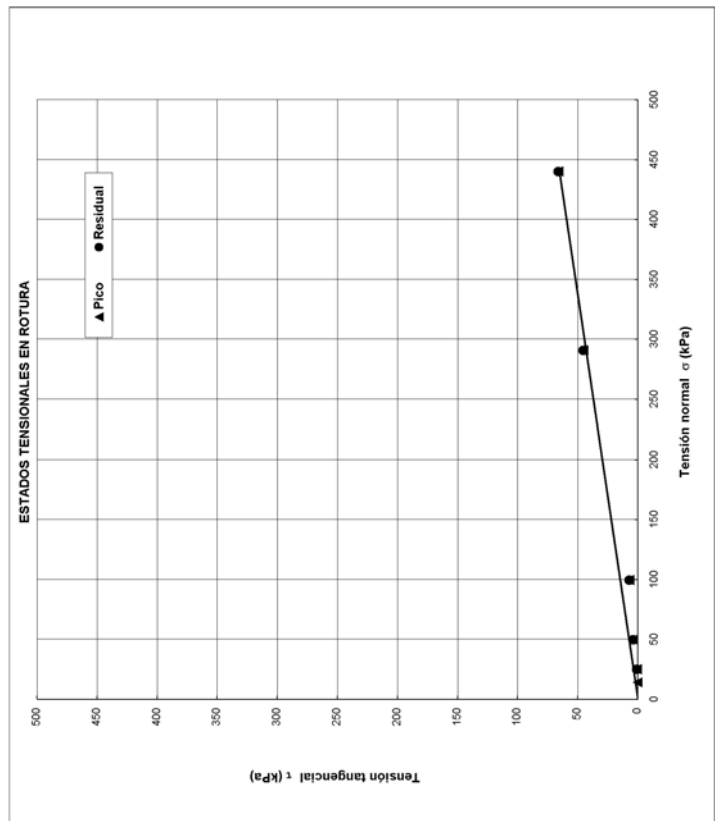
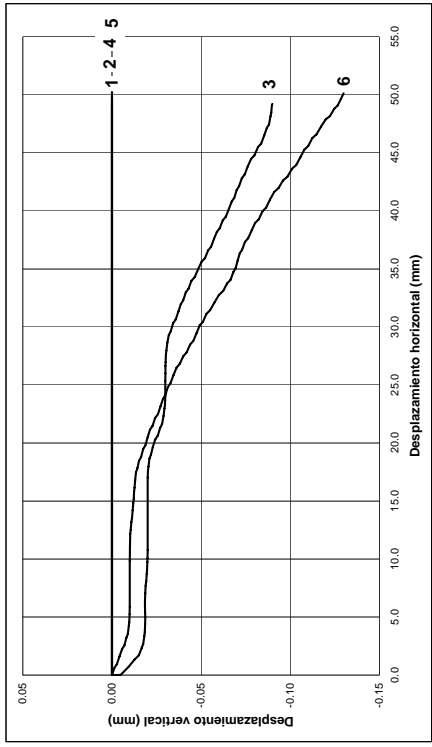
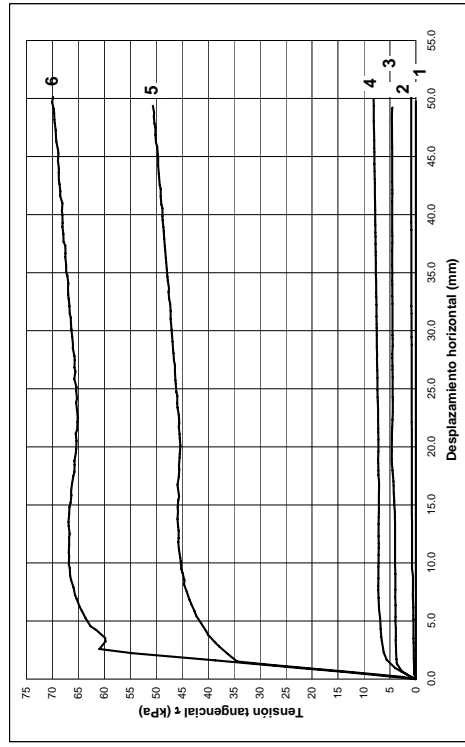
TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	0.00	0.61	3.90	6.89	45.48	65.11
T. tang. de pico τ_p (kPa)	0.00	0.61	3.90	6.89	45.48	65.11
T. tang. residual τ_r (kPa)	0.00	0.61	3.90	6.89	45.48	65.11
Geosintético superior						
GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT
Lado L (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espesor I (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Lado L (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Espesor I (mm)	335	335.0	335.0	335.0	335.0	335.0
Masa por unidad de área m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)						
Geosintético inferior						
GM	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Espesor I (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Lado L (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Espesor I (mm)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Masa por unidad de área m (g/m ²)						
V. de ensayo (mm/min)						

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 15

Fecha: 08/05/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT3
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

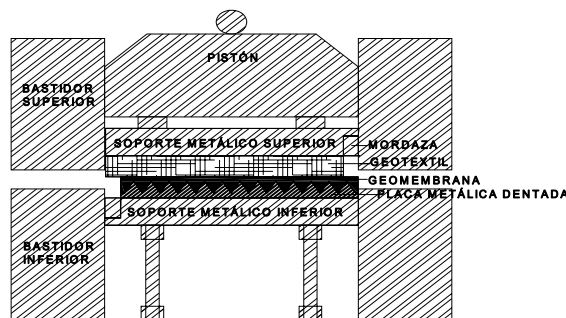
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



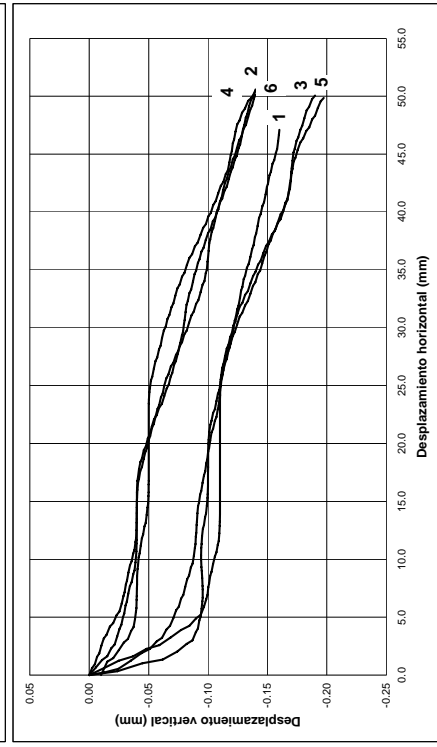
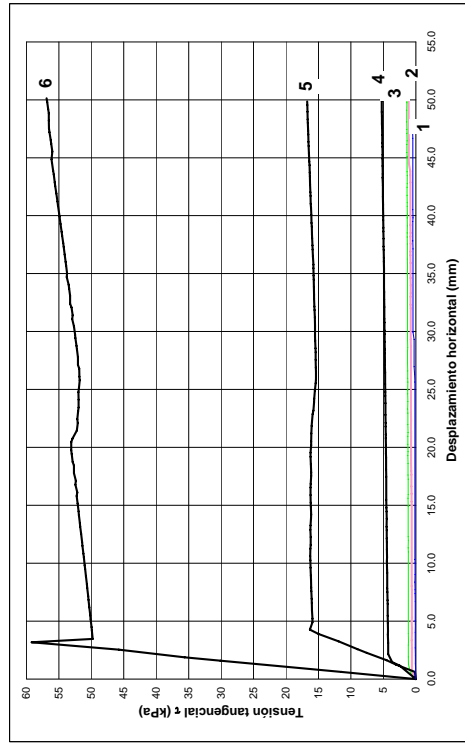
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo Nº: 15

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450



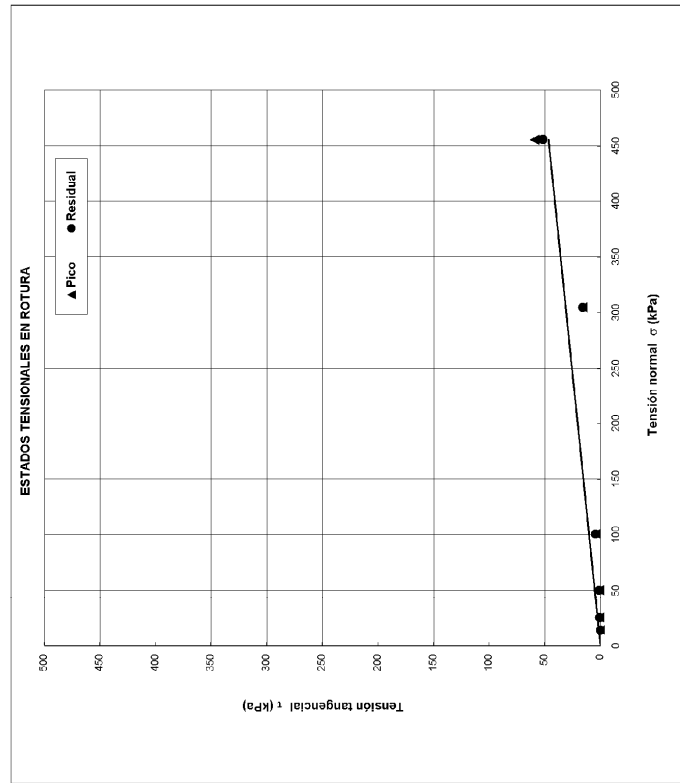
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 15

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal σ (kPa)	14	25	50	100	300	450
T. tapa de poco σ (kPa)	0.11	0.64	1.16	4.46	16.16	59.17
T. tapa residual σ (kPa)	0.11	0.64	1.16	4.46	16.16	51.80
Geosintético superior						
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
V. de ensayo (mm/min)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior						
Lado L ₁ (mm)	300	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 16

Fecha: 31/05/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT3
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

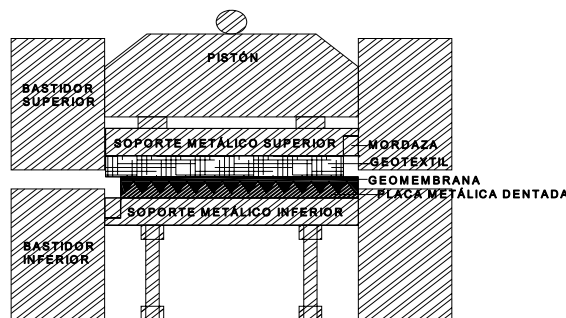
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:16

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

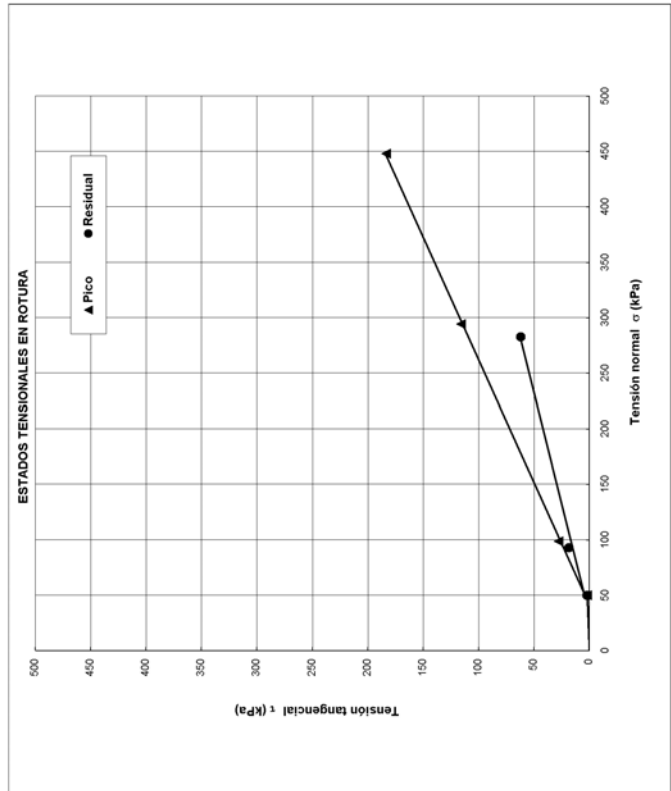
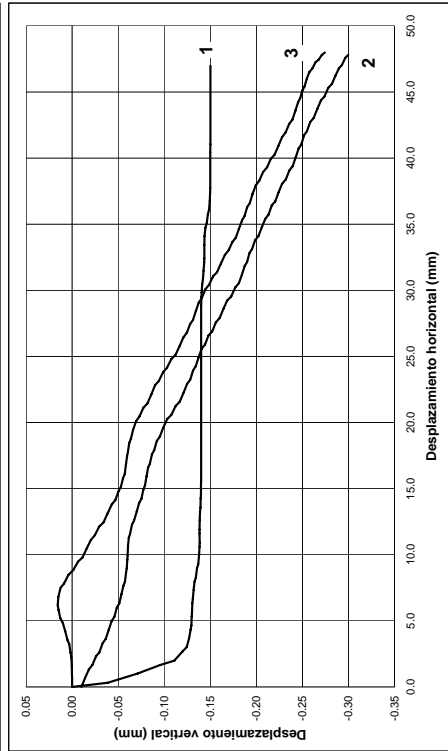
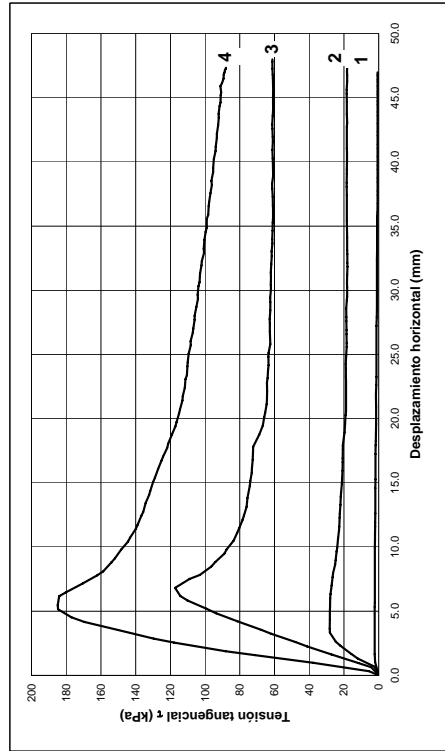
TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300	450	450
Tensión de pico τ (kPa)	2,09	27,76	113,76	183,47	
Tensión residual τ (kPa)	2,09	18,48	61,87		
Geotextil superior					
Grav.	GT				
Lado L (mm)	300,0	300,0	300,0	300,0	
Lado L (mm)	282,0	282,0	282,0	282,0	
Espesor t (mm)	4,1	4,1	4,1	4,1	
Humedad inicial, w(%)					
Humedad final, w(%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500,0	500,0	500,0	500,0	
V. de ensayo (mm/min)	5,000	5,000	5,000	5,000	
Geotextil inferior					
Lado L (mm)	300,0	300,0	300,0	300,0	
Lado L (mm)	282,0	282,0	282,0	282,0	
Espesor, t (mm)	1,5	1,5	1,5	1,5	
Humedad inicial, w(%)					
Humedad final, w(%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)					
V. de ensayo (mm/min)	5,000	5,000	5,000	5,000	

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300	450	450



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 17

Fecha: 01/06/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT3

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}

Marca comercial: AGRU

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

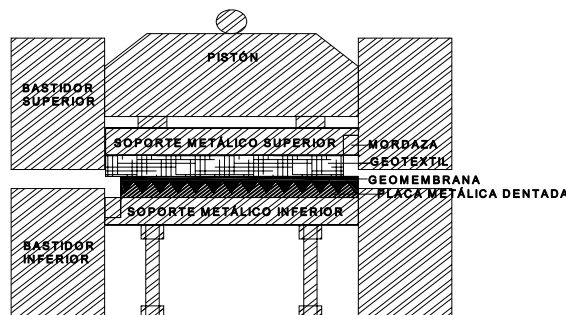
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:

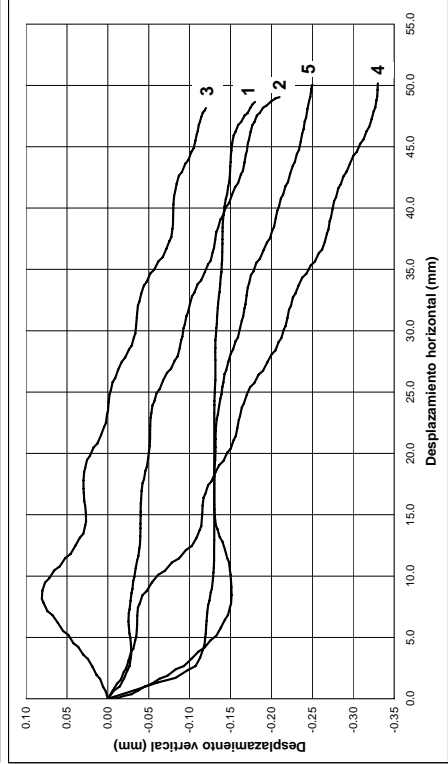
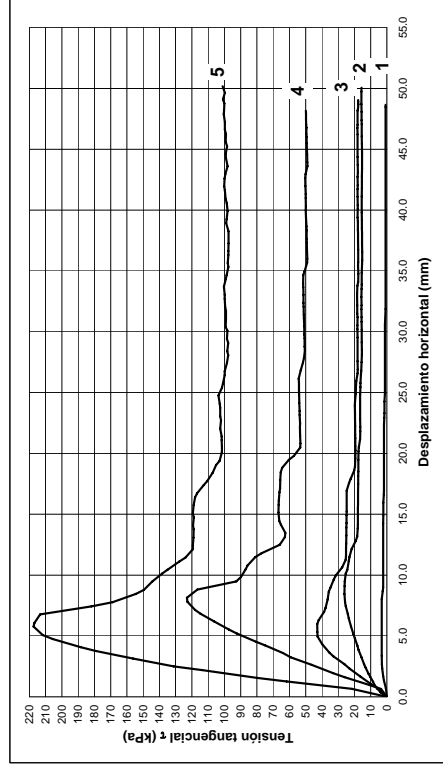


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:17

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	50	75	100	300	450

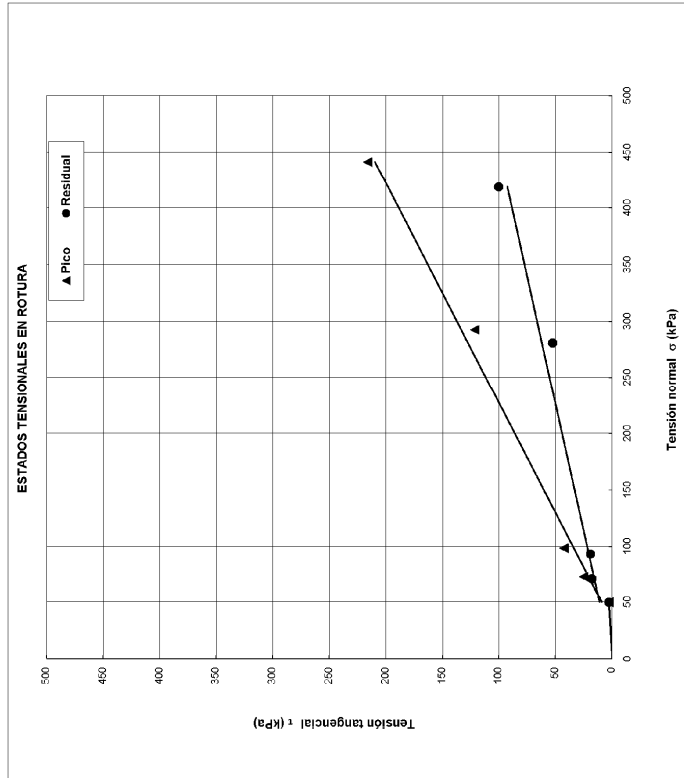


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:17

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300	450	75
Tensión residual σ_r (kPa)	2.64	42.57	121.28	215.92	25.36
Tensión residual τ_r (kPa)	2.64	18.97	52.26	100.37	17.84
Geosintético superior	GT	GT	GT	GT	GT
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor t (mm)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
V de ensayo (m ² /min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V de ensayo (m ² /min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 18

Fecha: 01/06/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT3
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S2}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 2

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5000, 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

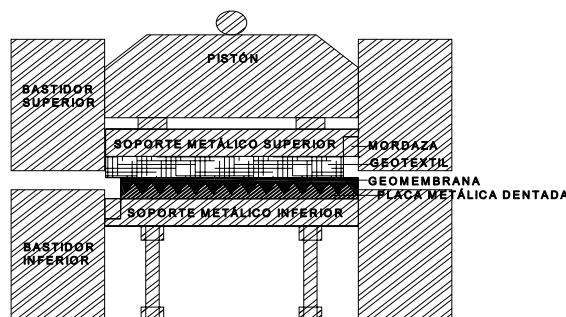
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



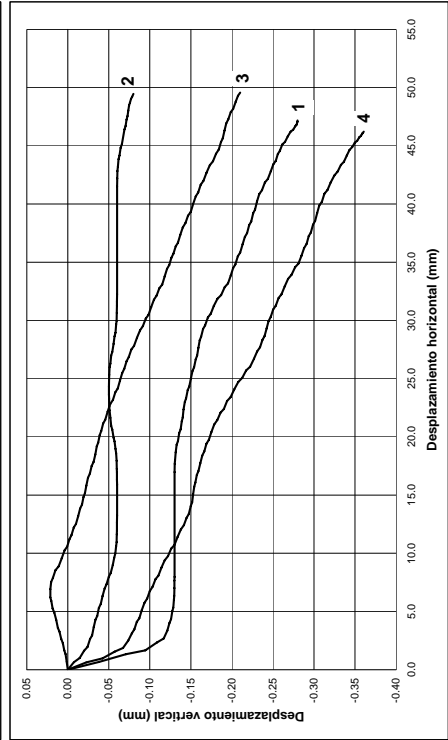
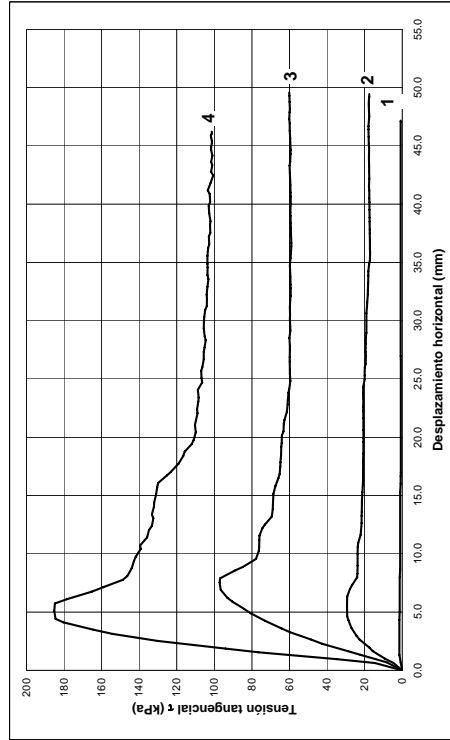
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 18

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	300	450	



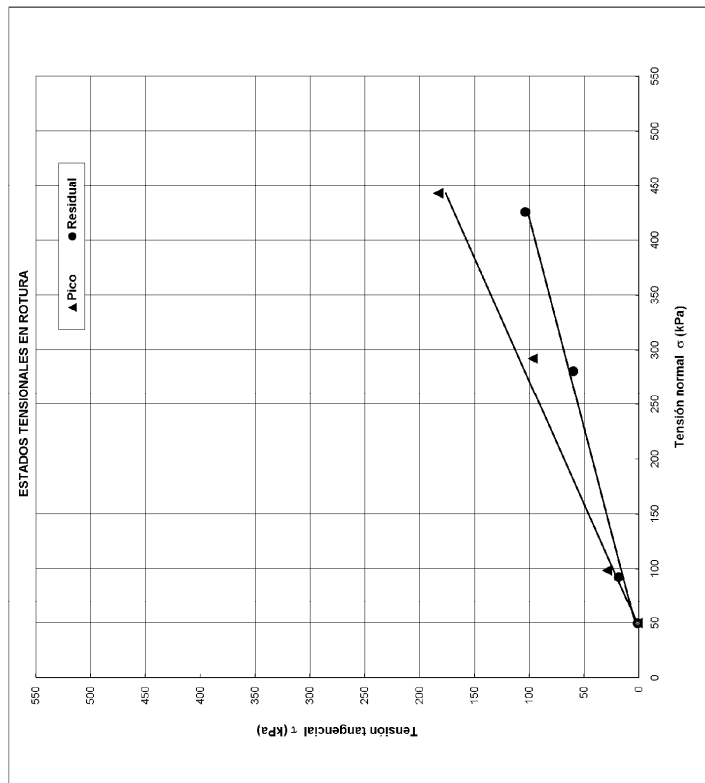
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 18

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	300	450	
T. tang. de pico, τ (kPa)	1.36	28.98	96.92	163.25	
T. tang. residual, τ (kPa)	1.36	18.59	59.70	103.51	
Geométrico superior					
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)	GW	GW	GW	GW	GW
Geométrico inferior					
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 19

Fecha: 02/06/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT3

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 1350, 250 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

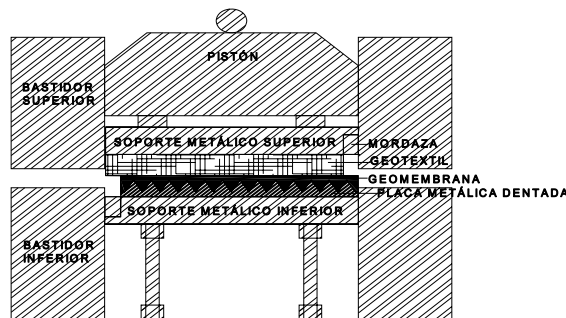
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

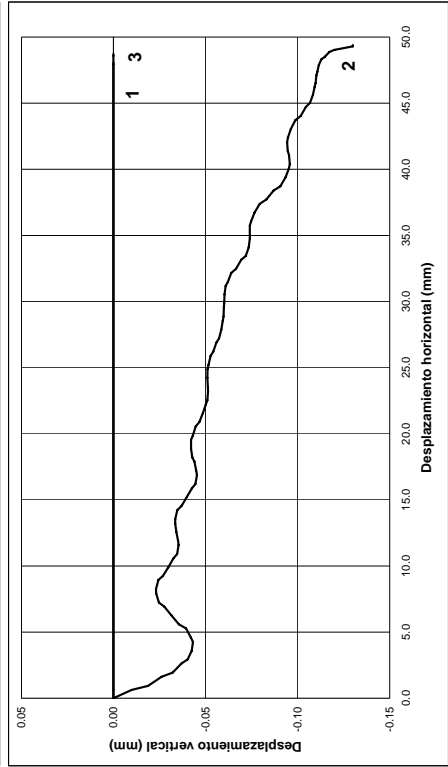
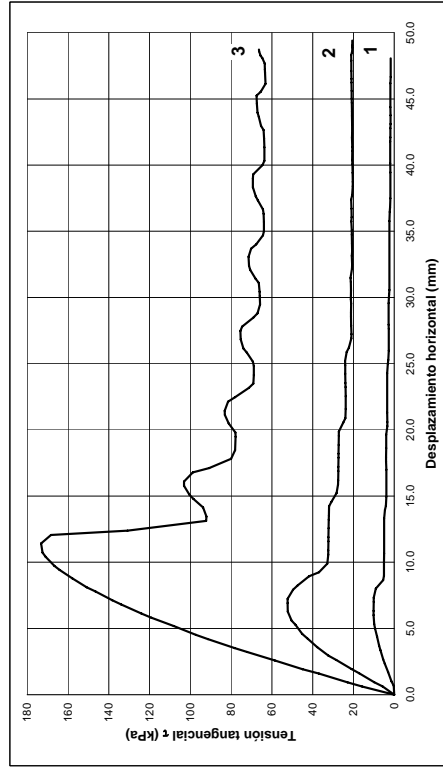
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 19

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

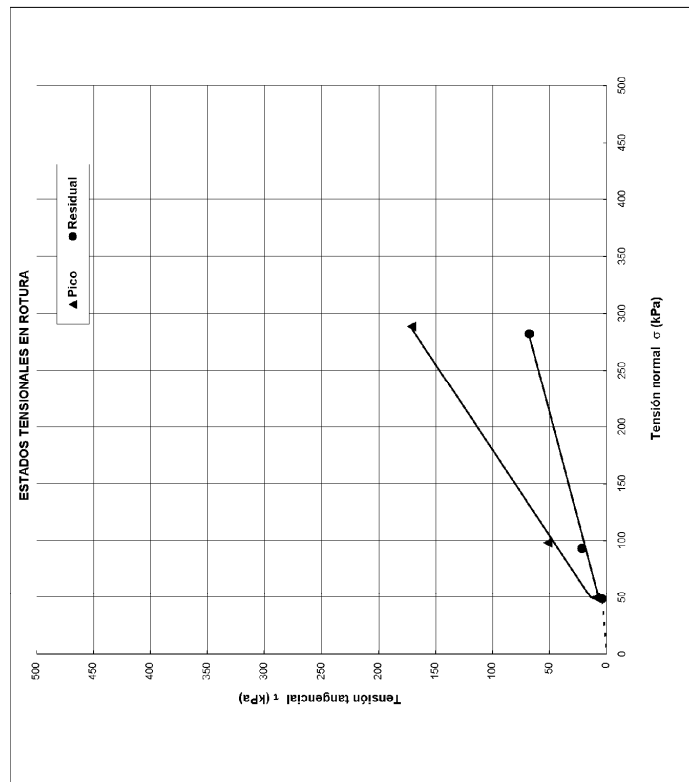
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 19

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300		
T tang de pico τ_c (kPa)	9.81	51.35	171.24		
T tang residual τ_r (kPa)	4.09	21.75	67.66		
Geosintético superior	GT	GT	GT		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	4.1	4.1	4.1		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500.0	500.0	500.0		
V de ensayo (mm ³ /min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V de ensayo (mm ³ /min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 20

Fecha: 22/08/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 50, 13.50, 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

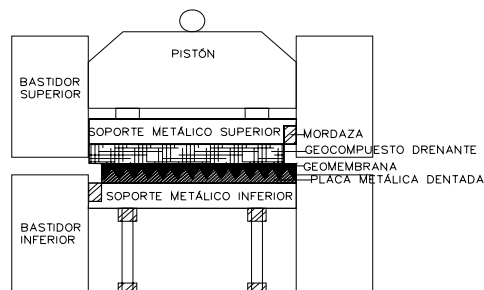
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 20

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

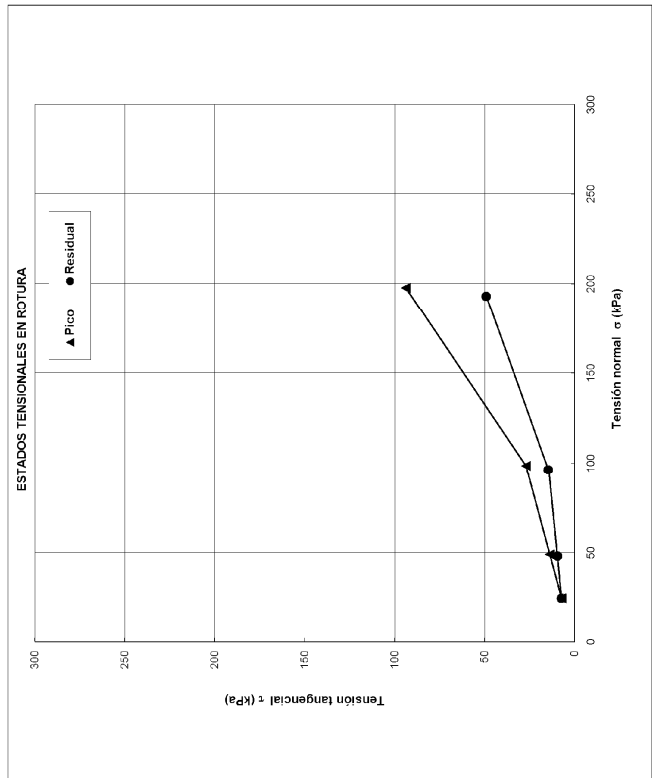
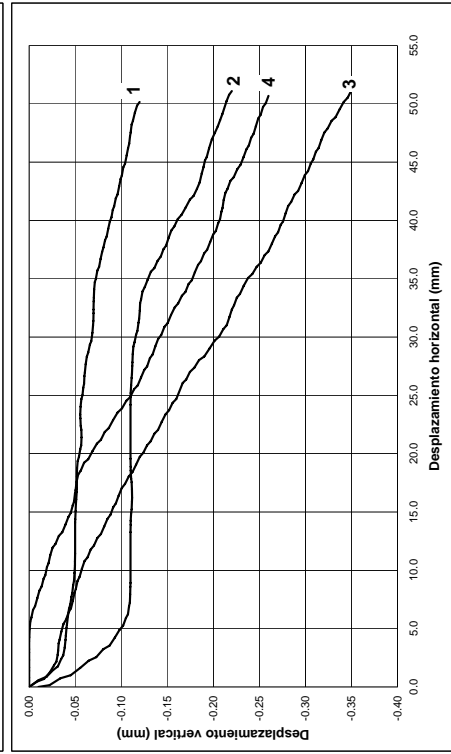
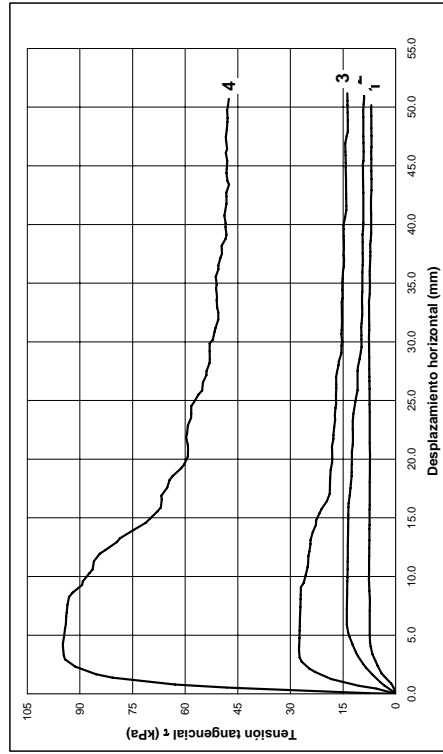
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	6
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	200	200
T. tang. de pico τ_p (kPa)	7.43	13.69	27.21	53.95	
T. tang. residual τ_r (kPa)	7.43	9.47	14.60	48.22	
Geométrico superior	GC	GC	GC	GC	GC
Lado, L, (mm)	300.0	300.0	300.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Humedad inicial, w _i (%)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Humedad final, w _f (%)					
Mo. Pasado, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0	710.0	710.0
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geométrico inferior	GM	GM	GM	GM	GM
Lado, L, (mm)	300.0	300.0	300.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Humedad inicial, w _i (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Humedad final, w _f (%)					
Mo. por unidad de área, m (g/m ²)					
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	200	200



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 21

Fecha: 28/08/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}
Marca comercial: AGRU
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 13.50, 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

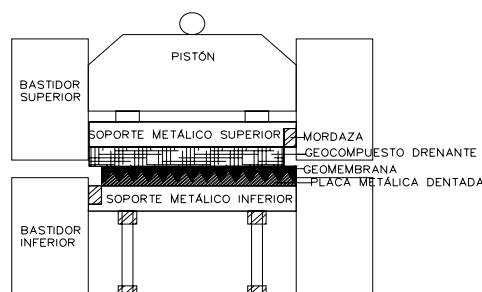
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

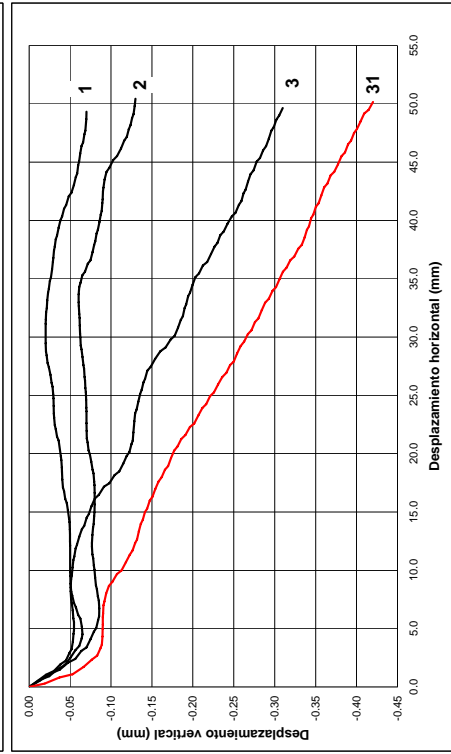
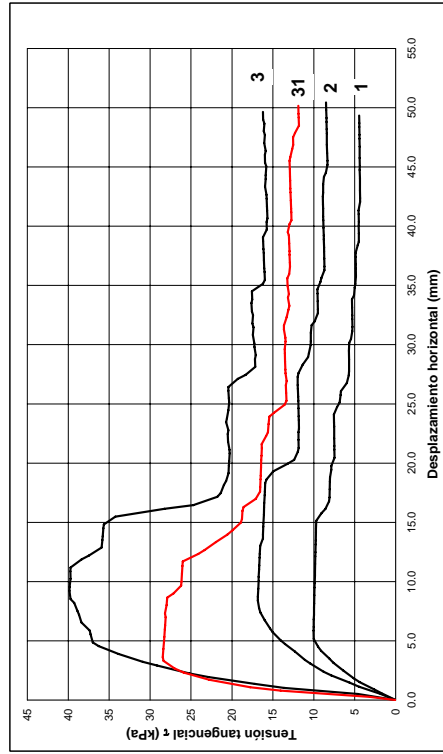
Ensayo Nº:21

MUESTRA: Geodren/GM-31: GT(300gr/m2)/GM TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	31
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	100
T. áng. de pico, τ_p (kPa)	9.29	16.34	37.48	28.45
T. áng. residual, τ_r (kPa)	9.29	9.23	16.33	11.81
Geosintético superior	GC	GC	GC	GT
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	282.0
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0	5.0
Humedad inicial, w(%)				
Humedad final, w(%)	950.0	950.0	950.0	950.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500	500	500	500
Geosintético inferior	GC	GC	GC	GT
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	282.0
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5
Humedad inicial, w(%)				
Humedad final, w(%)				
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)				

MUESTRA: Geodren/GM-31: GT(300gr/m2)/GM TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	31
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	100

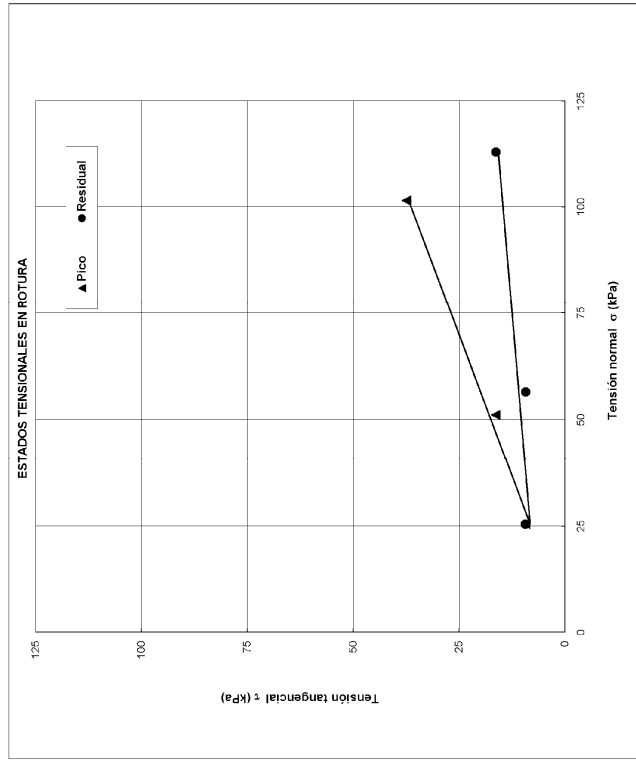


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:21

MUESTRA: Geodren/GM-31: GT(300gr/m2)/GM TIPO DE ENSAYO: SECO



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:21

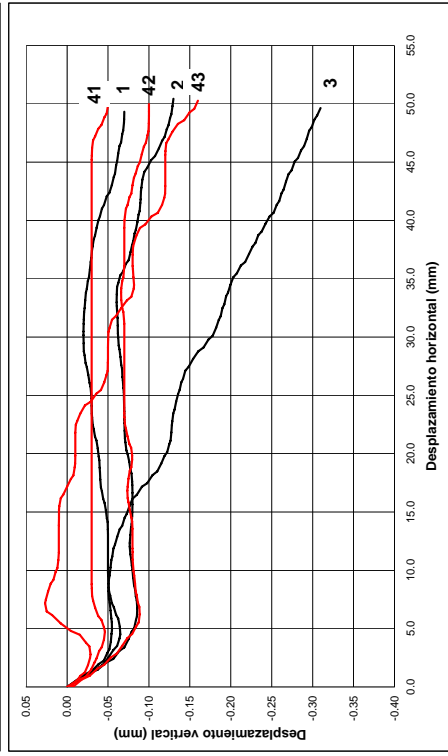
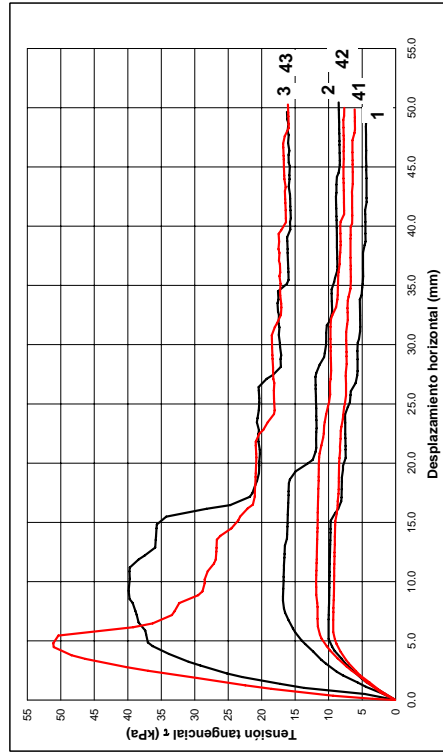
MUESTRA : Geodren/Geomembrana-41,42,43: Geotextil(cara de 200gr/m2)/GM TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	41	42	43
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	25	50	100
T. lang. de pico τ_p (kPa)	9.86	16.33	37.76	8.90	11.67	50.84
T. lang. residual τ_r (kPa)	4.54	6.67	15.97	8.90	8.04	17.23
Geosintético superior	GC	GC	GC	GC	GT	GT
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0	?	?	?
Humedad inicial, w _i (%)						
Humedad final, w _f (%)						
Masa por unidad de á.vea. m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0
V. de ensayo (mm ³ /m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.0
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Humedad inicial, w _i (%)						
Humedad final, w _f (%)						
Masa por unidad de á.vea. m (g/m ²)						
V. de ensayo (mm ³ /m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000

Adhesión, c_a (kPa) Pico Residual Residual geotextil solo
 Ángulo de rozamiento, ϕ (°) 21 9 4.1 7

MUESTRA: Geodren/Geomembrana-41,42,43: Geotextil(cara de 200gr/m2)/GM TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	41	42	43
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	25	50	100



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

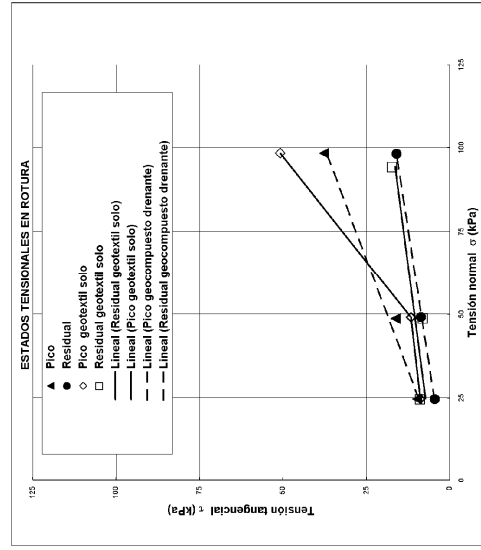
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:21

MUESTRA : Geodren/Geomembrana-41,42,43: Geotextil(cara de 200gr/m2)/GM TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	41	42	43
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	25	50	100
T. lang. de pico τ_p (kPa)	9.86	16.33	37.76	8.90	11.67	50.84
T. lang. residual τ_r (kPa)	4.54	6.67	15.97	8.90	8.04	17.23
Geosintético superior	GC	GC	GC	GC	GT	GT
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0	?	?	?
Humedad inicial, w _i (%)						
Humedad final, w _f (%)						
Masa por unidad de á.vea. m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0
V. de ensayo (mm ³ /m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.0
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Humedad inicial, w _i (%)						
Humedad final, w _f (%)						
Masa por unidad de á.vea. m (g/m ²)						
V. de ensayo (mm ³ /m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000

Adhesión, c_a (kPa) Pico Residual Residual geotextil solo
 Ángulo de rozamiento, ϕ (°) 21 9 4.1 7



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 22

Fecha: 29/08/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S2}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 2

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

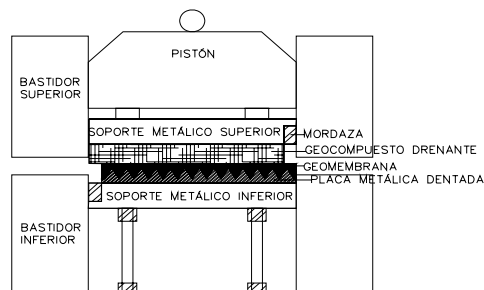
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

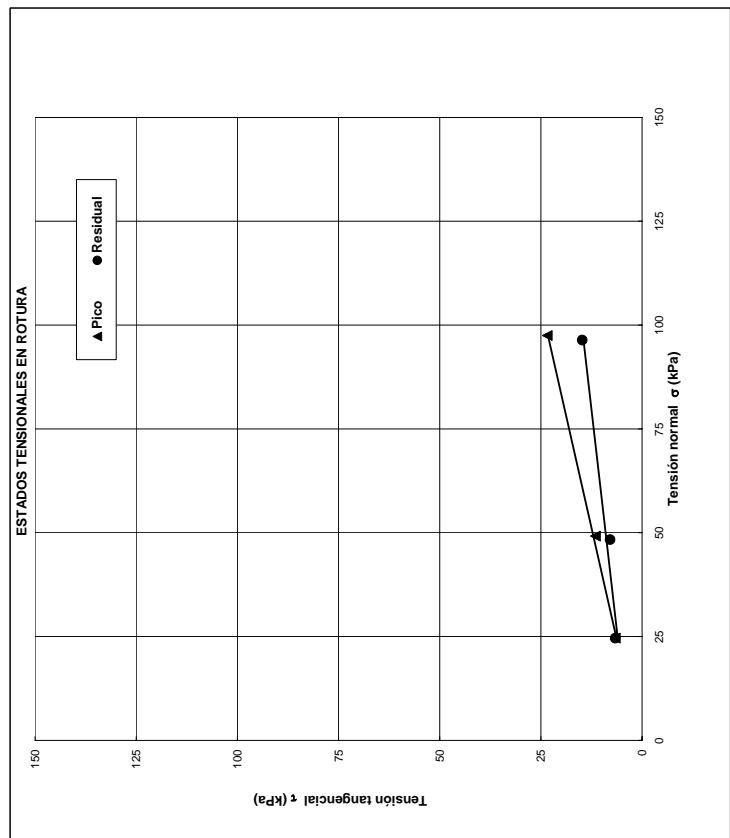
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:22

MUESTRA : Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T tang de pico τ (kPa)	6.64	11.51	23.42		
T tang residual τ_r (kPa)	6.64	7.89	14.78		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	65.0	65.0	65.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V de ensayo (mm/min)	5mm	5mm	5mm		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V de ensayo (mm/min)					



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

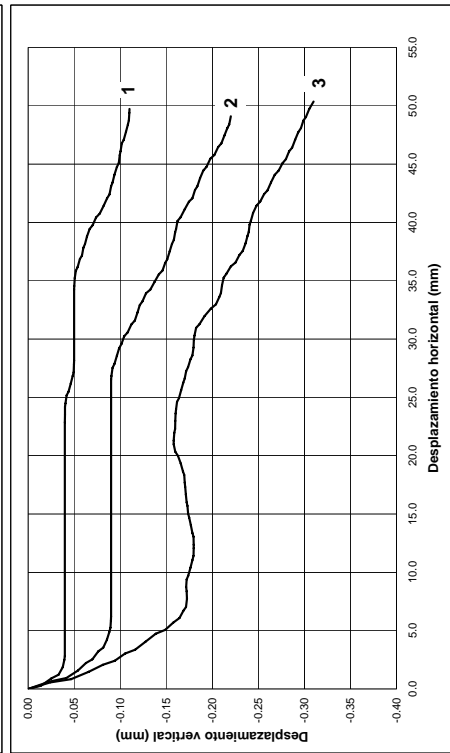
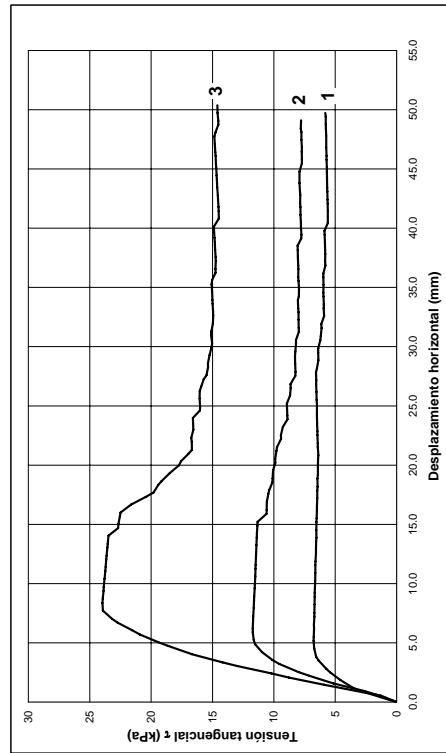
ASTM D5321-02

Ensayo Nº:22

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 23

Fecha: 24/08/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 13.50 kN, 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

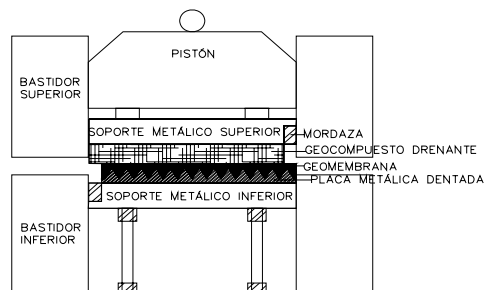
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



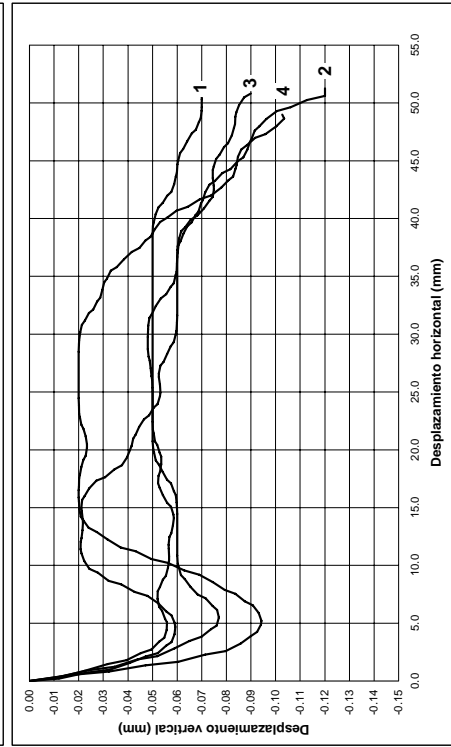
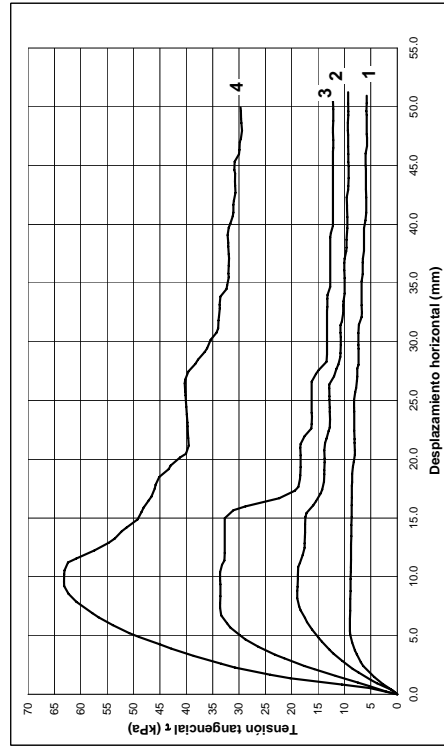
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:23

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	75	100	



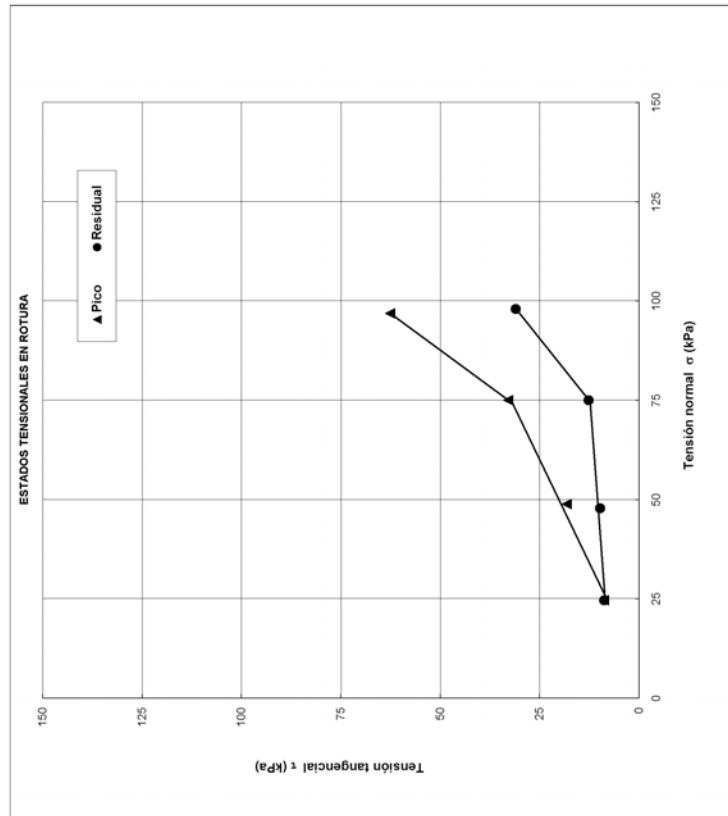
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:23

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	75	100	
T. tang. de pico τ_p (kPa)	8.82	16.26	32.92	62.60	
T. tang. residual τ_r (kPa)	8.78	9.78	12.62	30.99	
Geométrico superior	GC	GC	GC	GC	
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	197.0	282.0	
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	180.0	282.0	
Espesor, l (mm)	5.0	5.0	5.0	5.0	
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0	950.0	
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	
Geométrico inferior	GM	GM	GM	GM	
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	197.0	282.0	
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	180.0	282.0	
Espesor, l (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 24

Fecha: 29/08/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

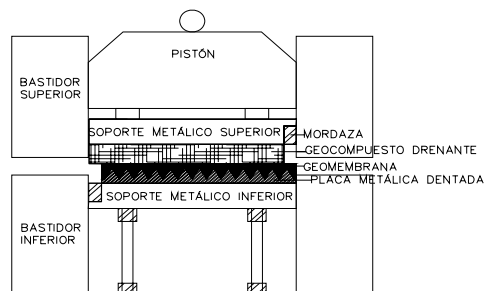
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

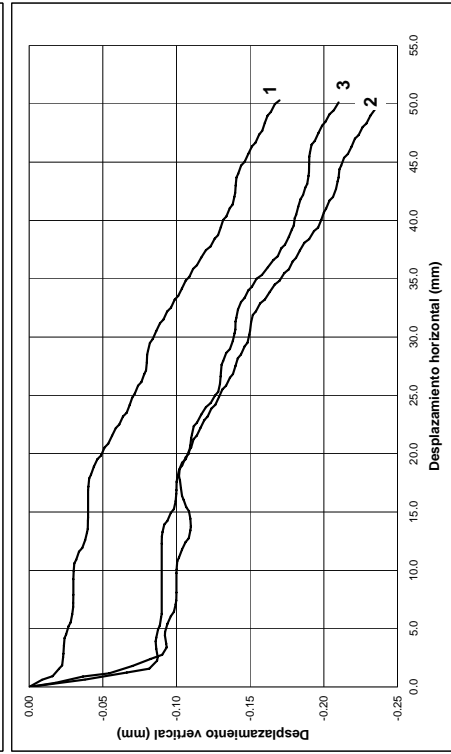
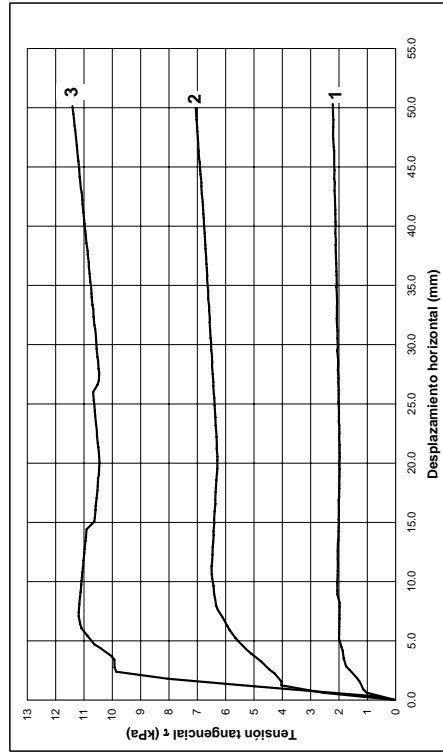
Ensayo Nº:24

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	150		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

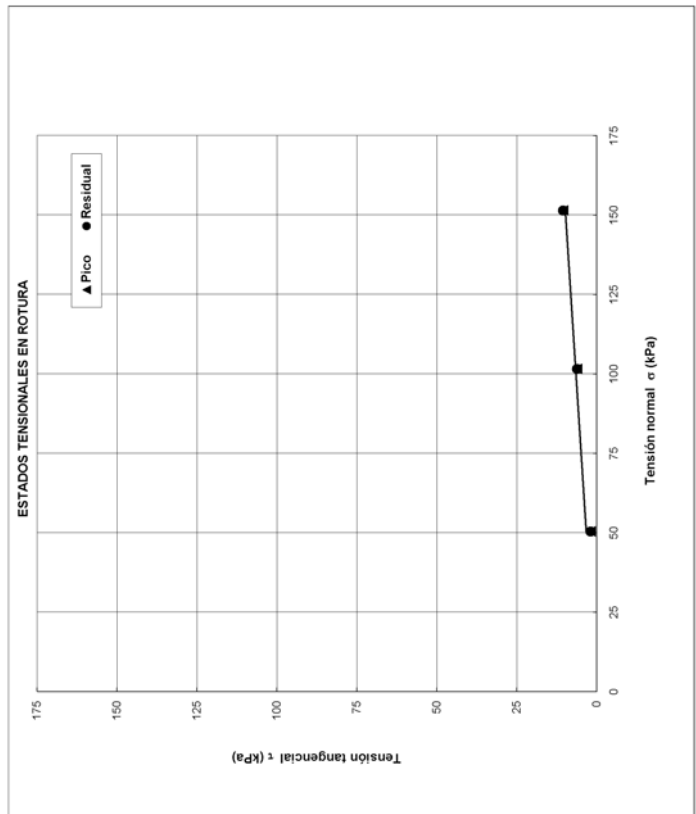
Ensayo Nº:24

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	150		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	1.93	6.15	10.57		
T. tang. residual τ_r (kPa)	1.93	6.15	10.57		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 25

Fecha: 29/08/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored).

Geosintético: Geomembrana GM_{R4}
Función: Impermeabilización.

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

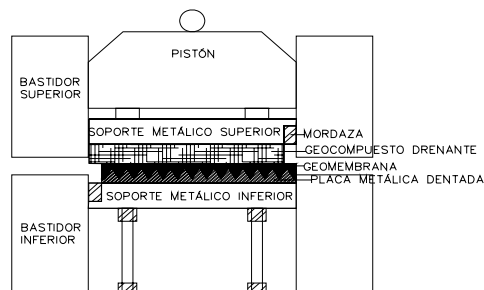
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

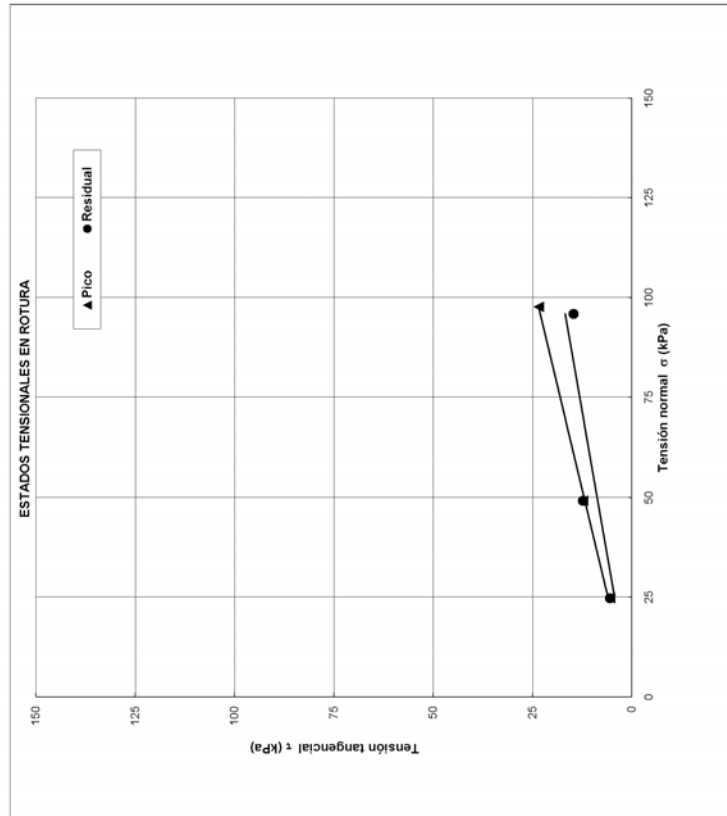
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:25

MUESTRA : Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

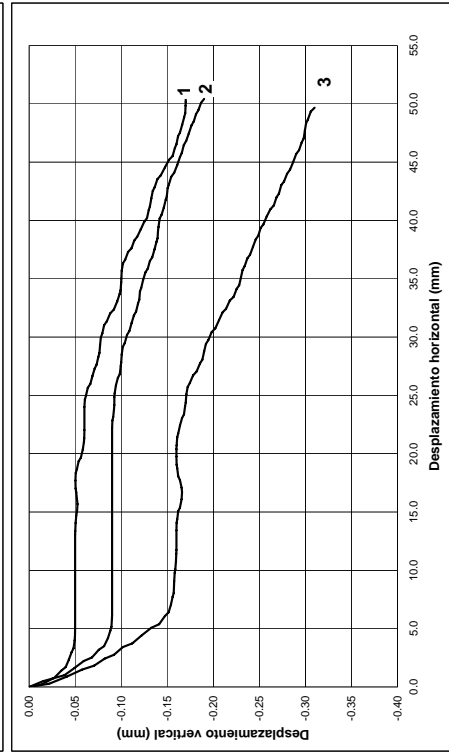
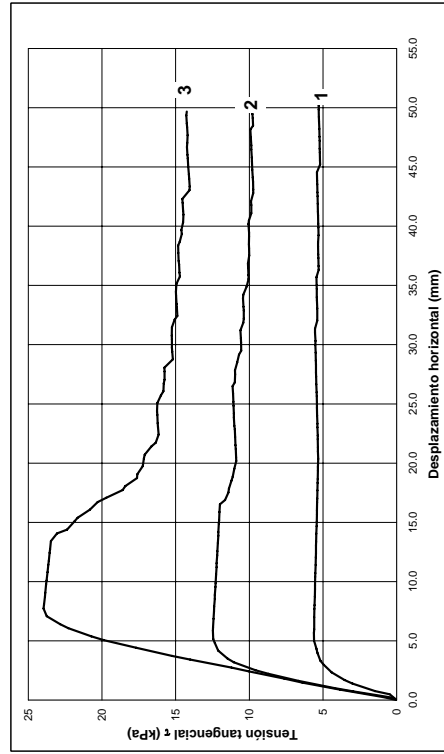
Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T tang de pico τ (kPa)	5.49	12.22	23.45		
T tang residual τ_r (kPa)	5.49	12.22	14.83		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		
V de ensayo (mm ³ /min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm ³ /min)					



MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 26

Fecha: 05/09/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT1

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R4}

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 1350 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

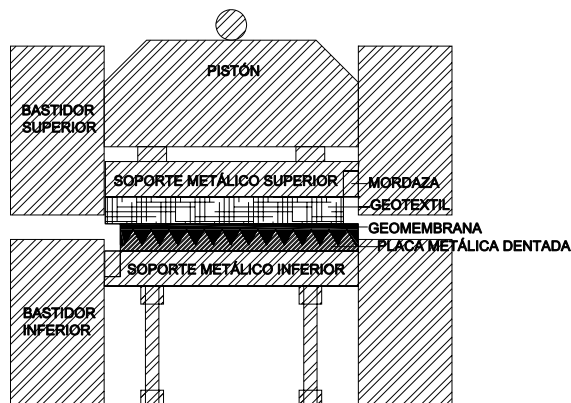
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

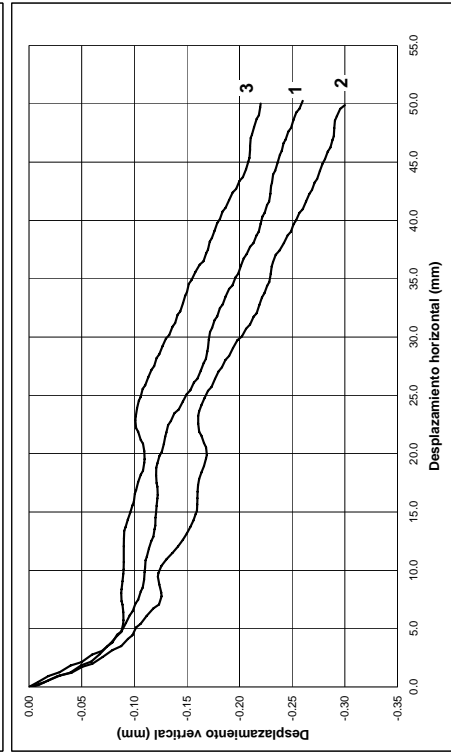
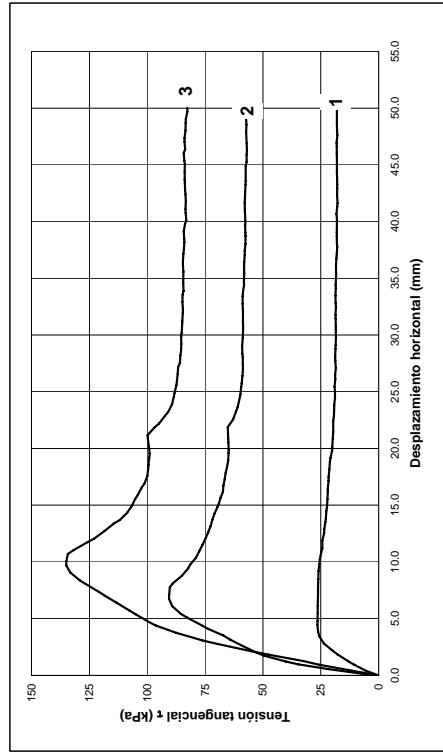
ASTM D5321-02

Ensayo Nº:26

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

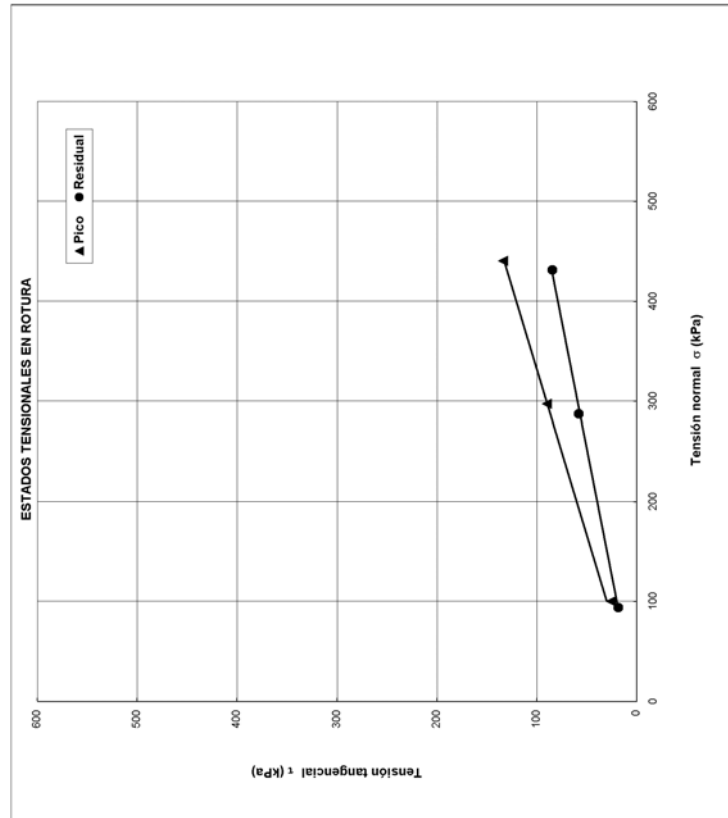
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:26

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	25.81	89.91	134.01		
T. tang. residual τ_r (kPa)	18.50	58.04	84.56		
Geosintético superior					
GT	GT	GT	GT		
Lado L (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado V (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	4.0	4.0	4.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500.0	500.0	500.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior					
GT	GM	GM	GM		
Lado L (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado V (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.4	1.4	1.4		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 27

Fecha: 11/09/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT2

Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R4}

Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 1350 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

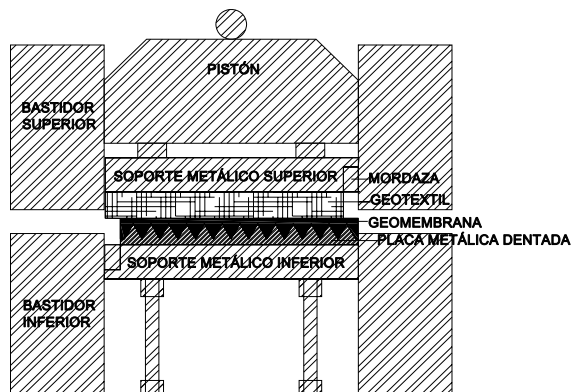
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:27

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

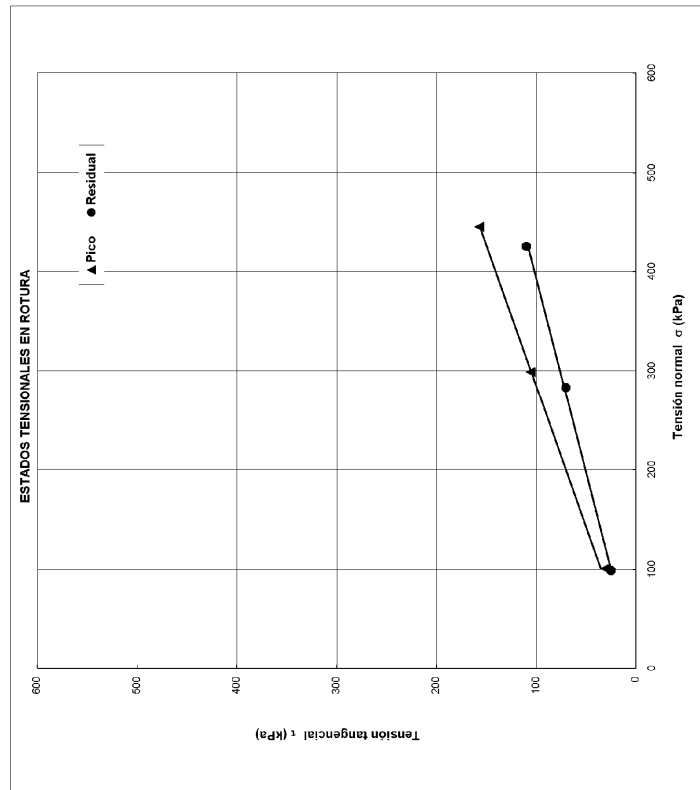
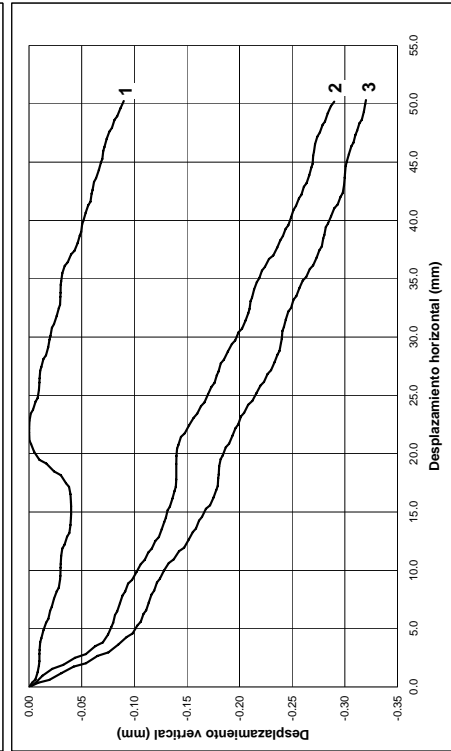
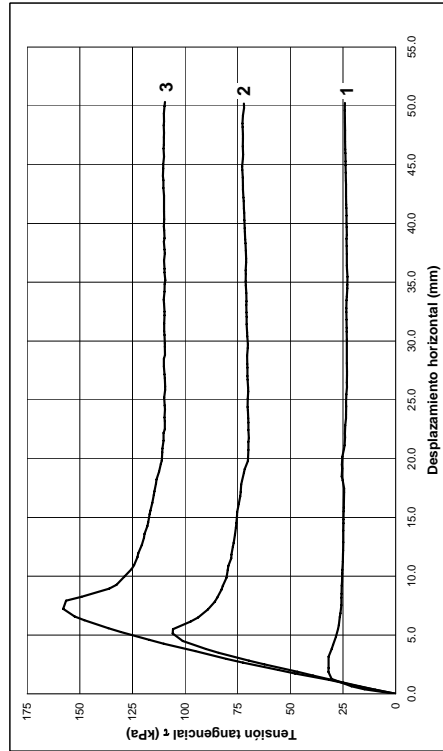
Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		
T ₁ tang. de pico τ_p (kPa)	31.14	106.79	167.22		
T ₁ tang. residual τ_r (kPa)	25.18	70.16	110.00		
Geosintético superior	GT	GT	GT		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	335.0	335.0	335.0		
V de ensayo (mm ³ /mm)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.4	1.4	1.4		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V de ensayo (mm ³ /mm)					

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO:

SUMERGIDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	450		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 28

Fecha: 12/09/2006

Muestra: GEOTEXTIL/GEOMEMBRANA

Geosintético: Geotextil GT3
Función: Protección de geomembranas

Geosintético: Geomembrana GM_{R4}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 1350 kg, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

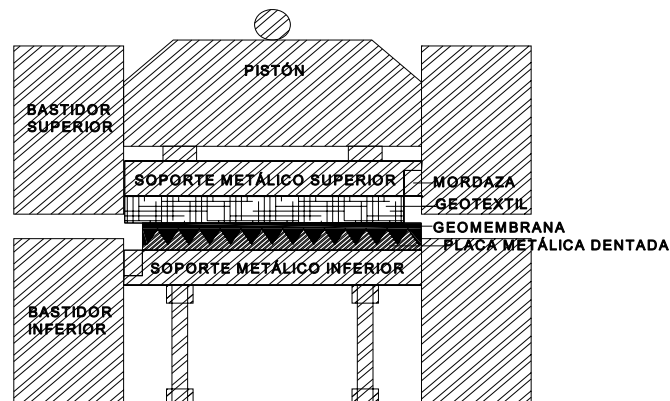
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geotextil pegado a soporte superior y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

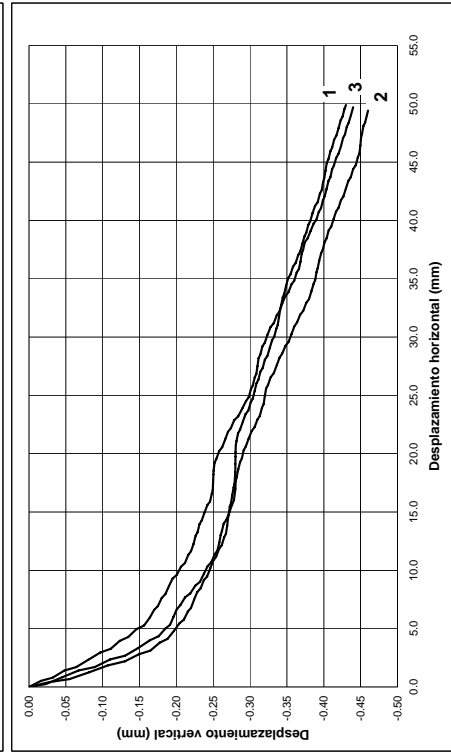
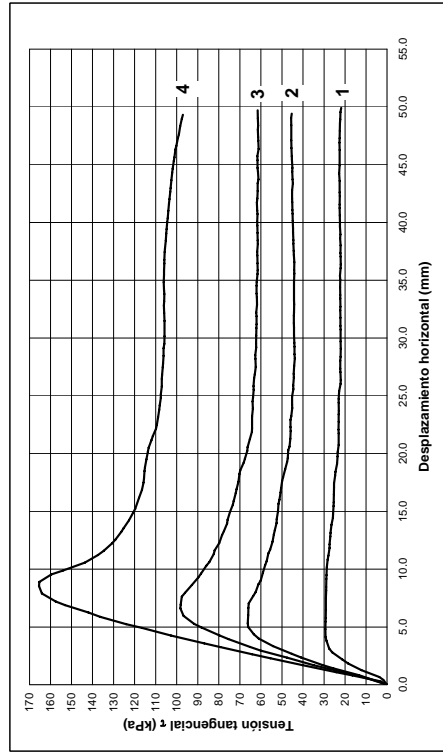
ASTM D5321-02

Ensayo N°:28

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGID

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	450	5



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

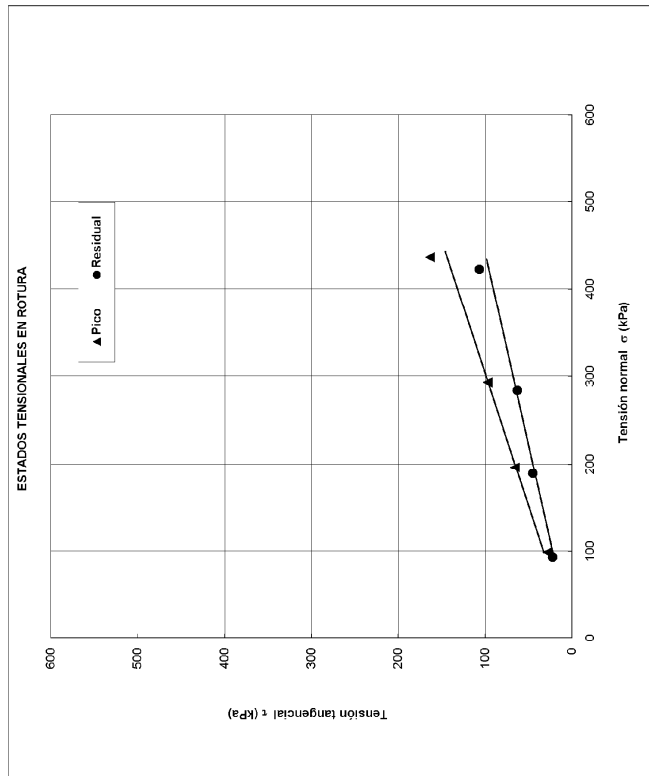
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:28

MUESTRA: Geotextil/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SUMERGIDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	450	5000	5000
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	28.38	65.99	97.37	163.65	5000	5000
T. tang. residual, τ_r (kPa)	22.48	44.95	62.86	106.63	5000	5000
Geométrico superior	GT	GT	GT	GT	GT	GT
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
Humedad inicial, w _i (%)						
Humedad final, w _f (%)						
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	500.0	500.0	500.0	500.0	5000	5000
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geométrico inferior	GIN	GIN	GIN	GIN	GIN	GIN
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Humedad inicial, w _i (%)						
Humedad final, w _f (%)						
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
V. de ensayo (mm/min)						



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 29

Fecha: 03/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
140 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

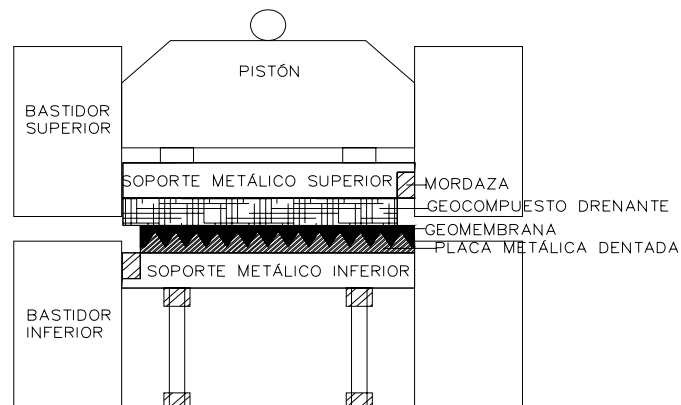
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



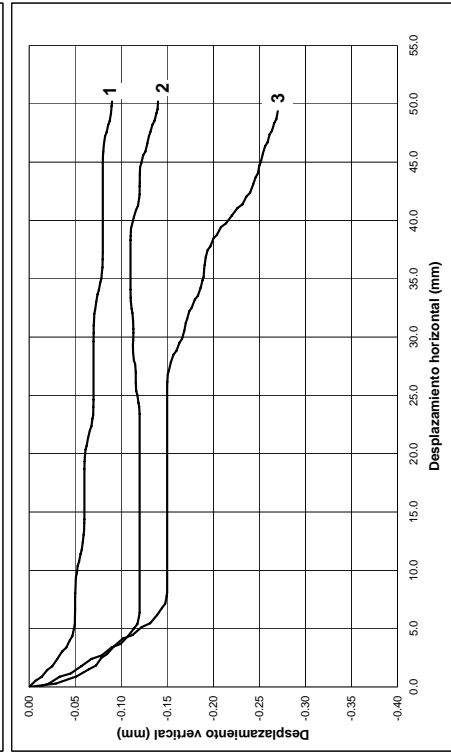
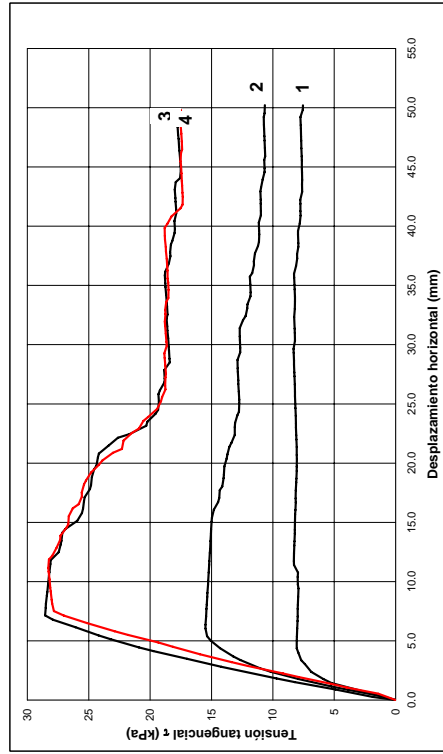
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo Nº:29

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100	100	100



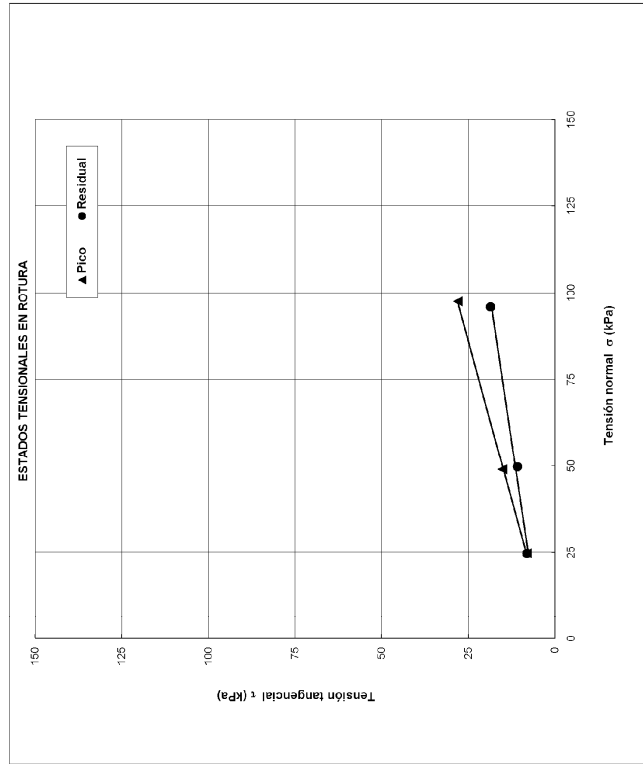
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:29

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	8.07	15.24	28.03		
T. tang. residual τ_r (kPa)	8.07	10.85	18.56		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Humedad inicial w _i (%)					
Humedad final w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Apo L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Humedad inicial w _i (%)					
Humedad final w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 30

Fecha: 03/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
140 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 1

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 13.50, 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

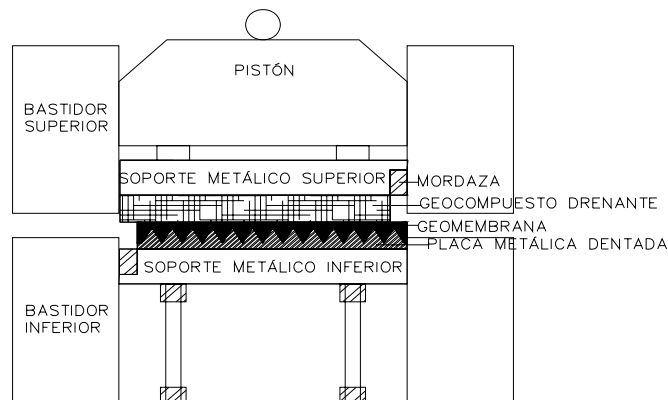
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:30

MUESTRA : Geocompuesto drenante/Geomembrana

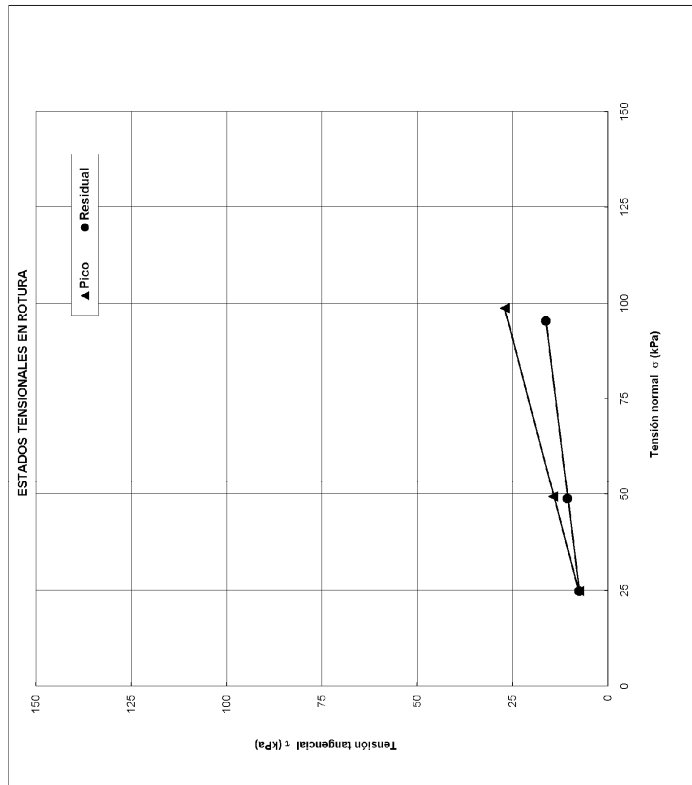
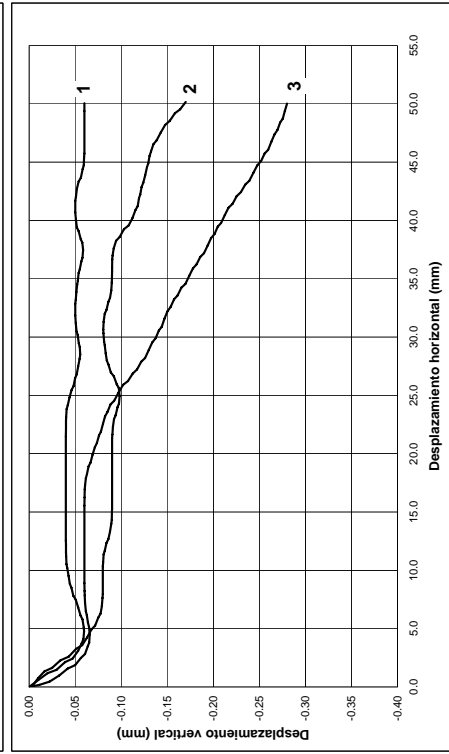
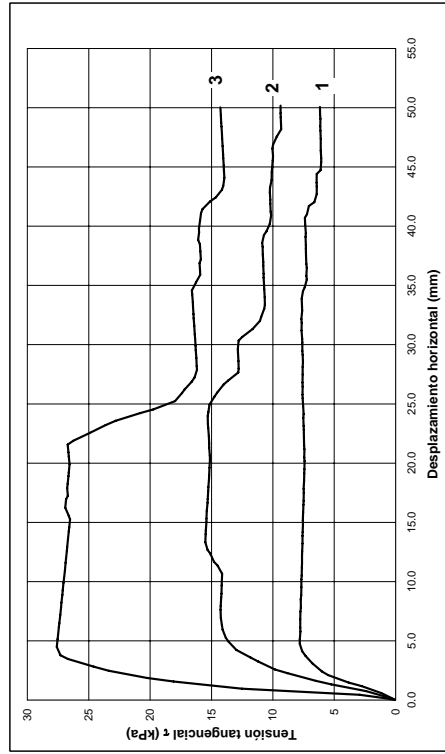
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	7.48	14.43	27.07		
T. tang. residual τ_r (kPa)	7.48	10.65	16.28		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 31

Fecha: 04/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R2S2}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
140 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD). Cara 2

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

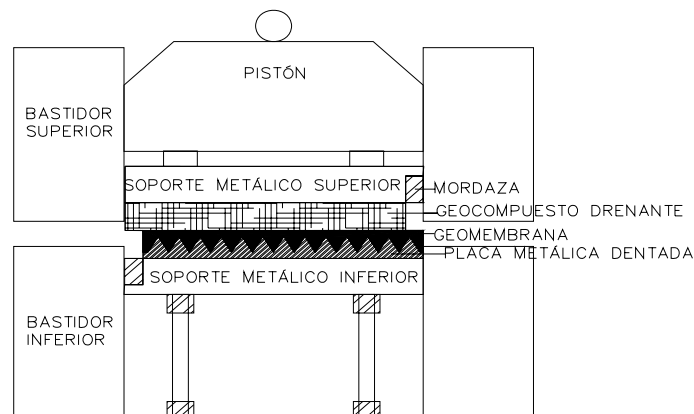
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

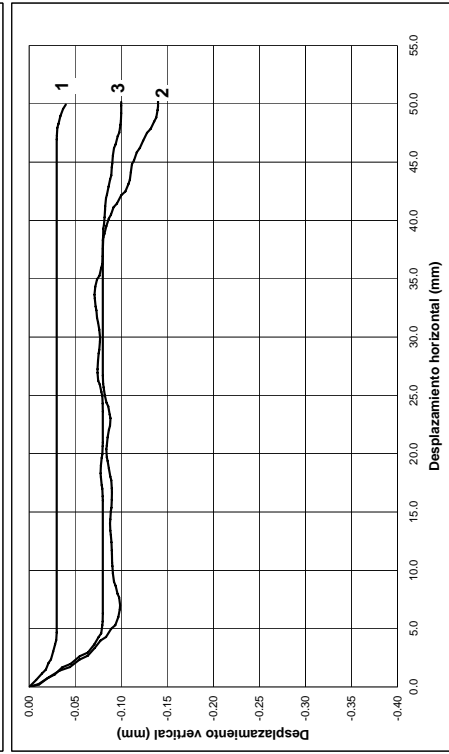
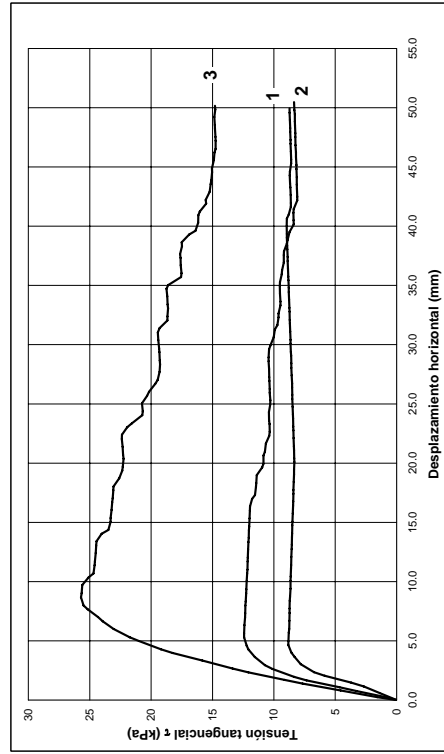
Ensayo Nº:31

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

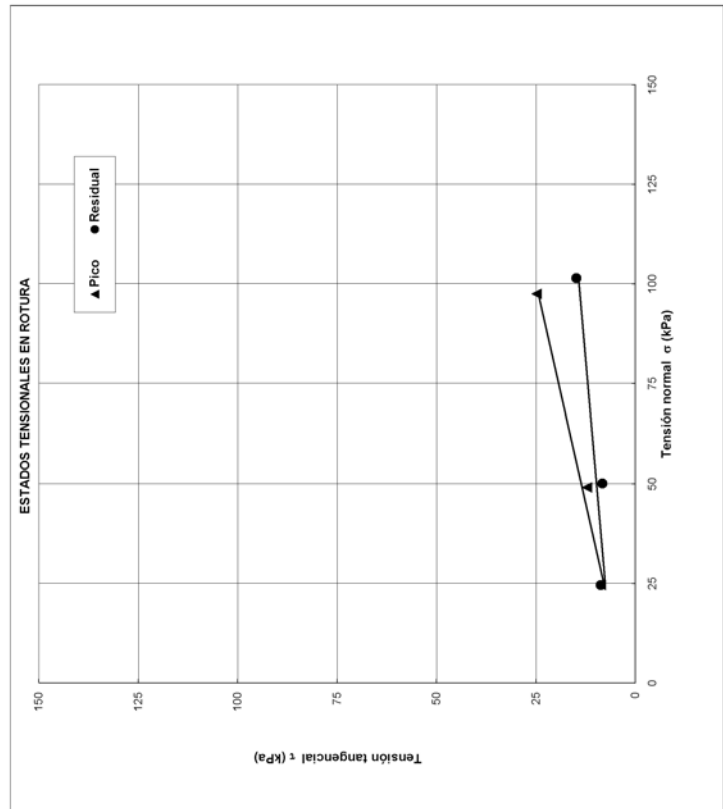
Ensayo Nº:31

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	8,65	12,22	24,82		
T. tang. residual τ_r (kPa)	8,65	8,25	14,86		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300,0	300,0	300,0		
Lado, L ₂ (mm)	282,0	282,0	282,0		
Espesor, t (mm)	5,0	5,0	5,0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710,0	710,0	710,0		
V. de ensayo (mm/min)	5,000	5,000	5,000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300,0	300,0	300,0		
Lado, L ₂ (mm)	282,0	282,0	282,0		
Espesor, t (mm)	1,5	1,5	1,5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5,000	5,000	5,000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 32

Fecha: 04/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
140 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 13.50 kN, 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

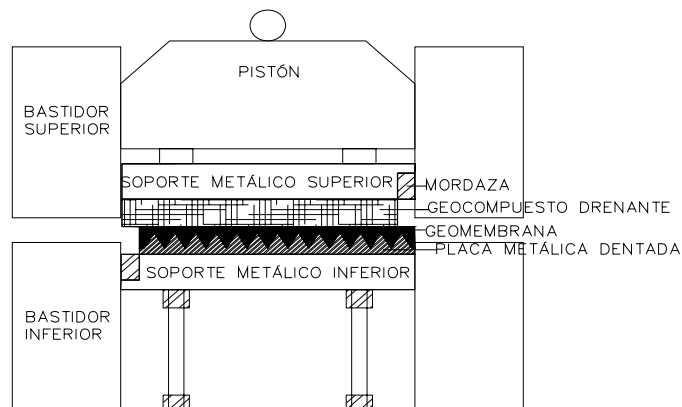
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

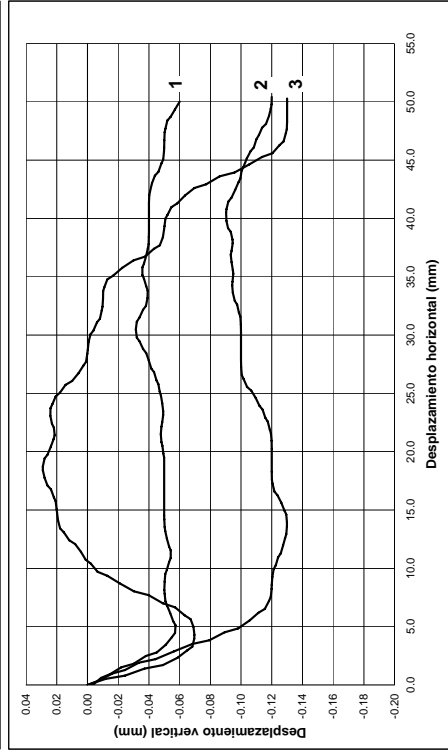
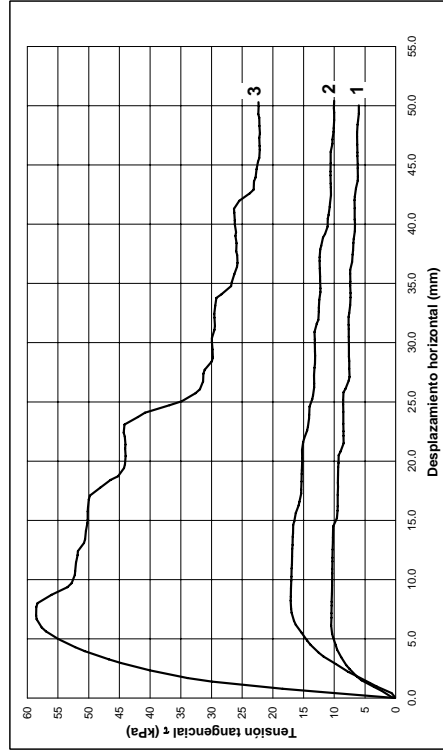
Ensayo Nº:32

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

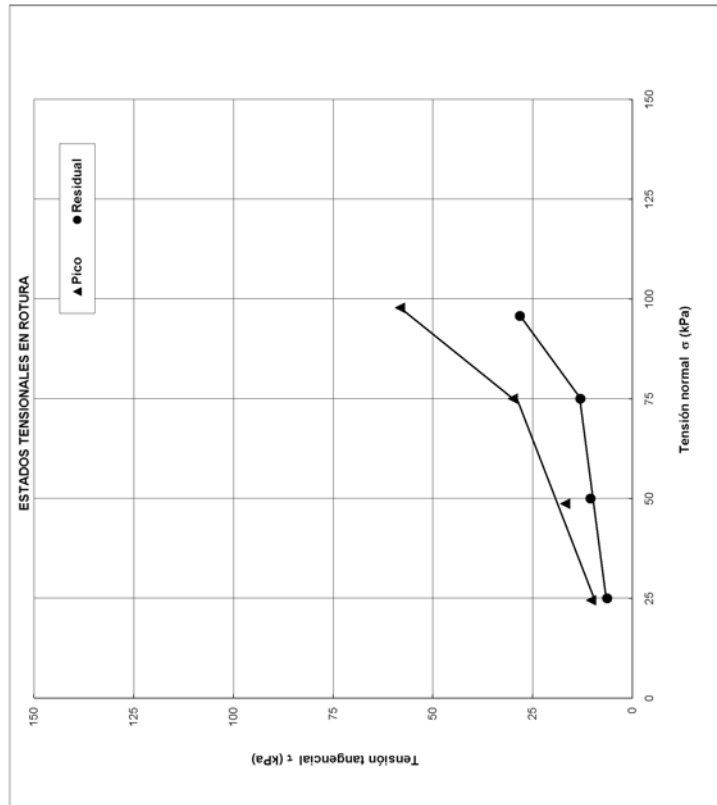
Ensayo Nº:32

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	6
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	10.33	16.89	56.31		
T. tang. residual τ_r (kPa)	6.34	10.48	28.18		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 33

Fecha: 05/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_{R4}
Función: Impermeabilización.

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
140 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

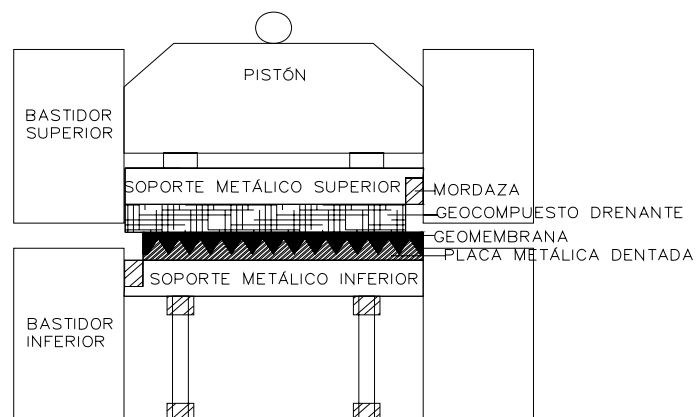
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:33

MUESTRA : Geocompuesto drenante/Geomembrana

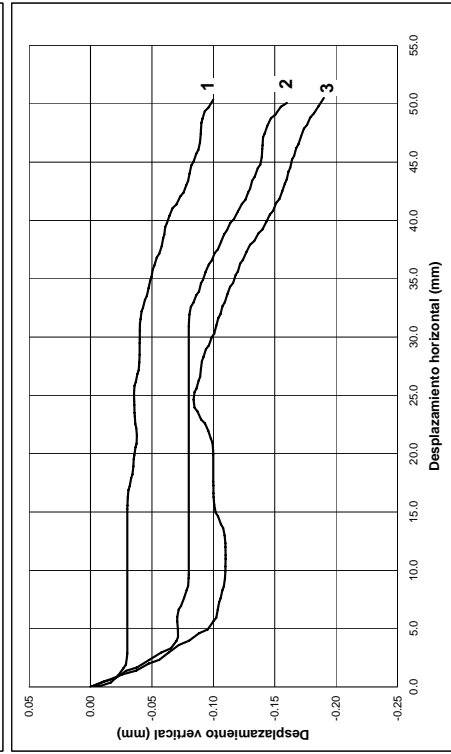
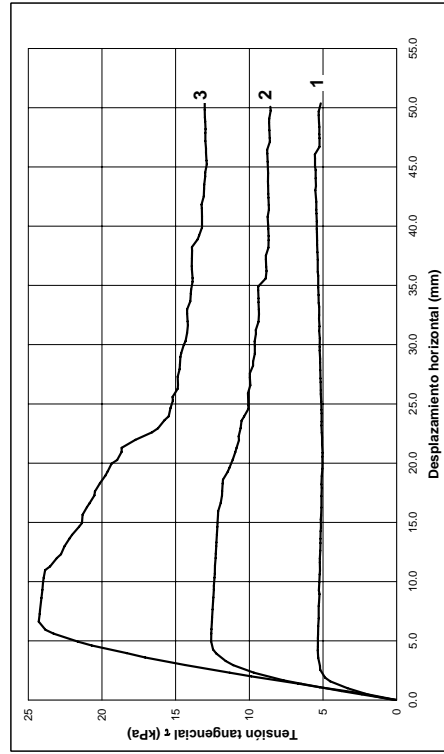
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	5.27	12.38	23.54		
T. tang. residual τ_r (kPa)	5.27	8.72	13.05		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	292.0	292.0	292.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	292.0	292.0	292.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



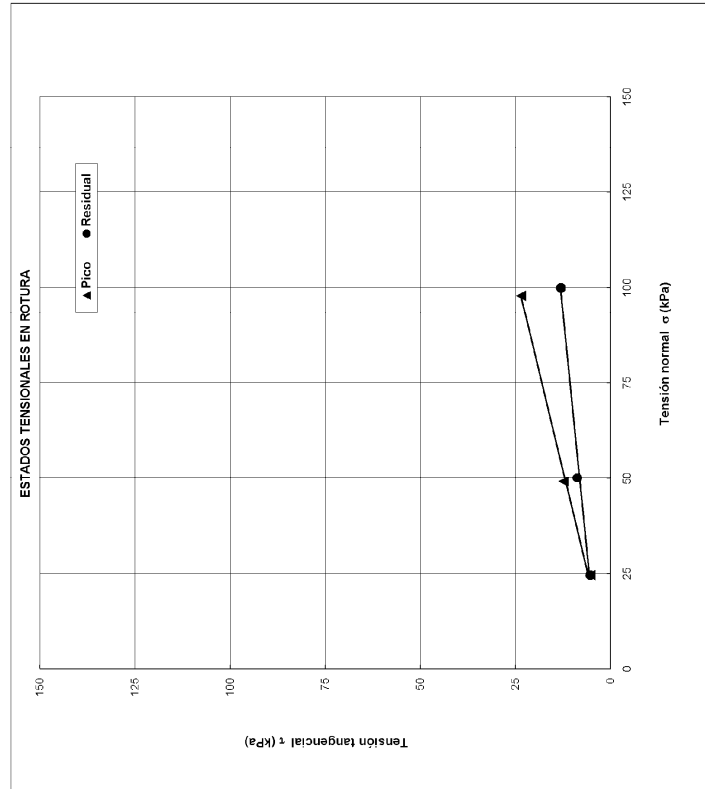
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:33

MUESTRA : Geocompuesto drenante/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 34

Fecha: 06/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomembrana

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
140 gr/m²

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

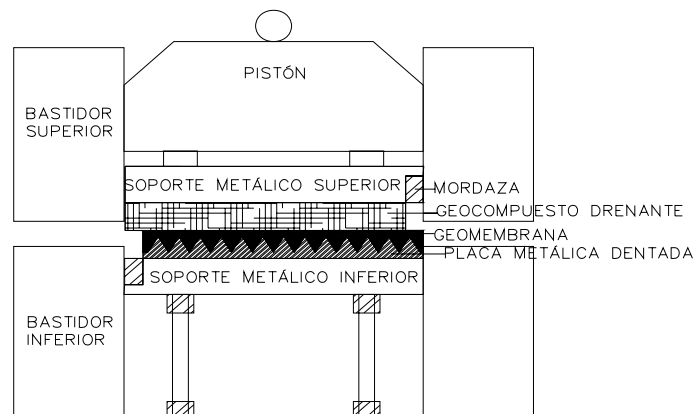
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

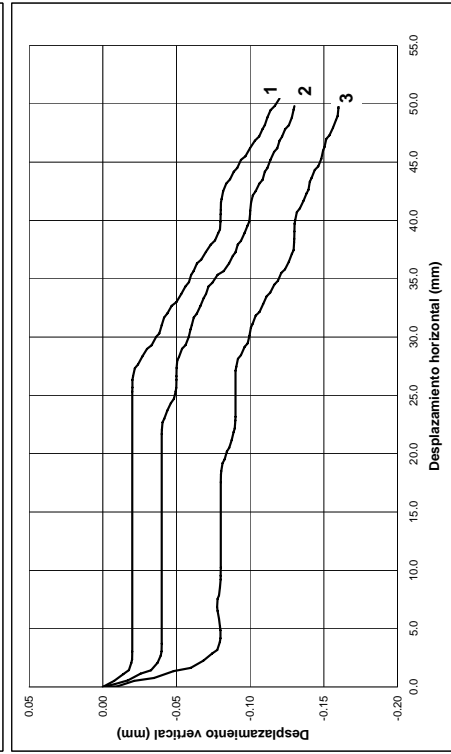
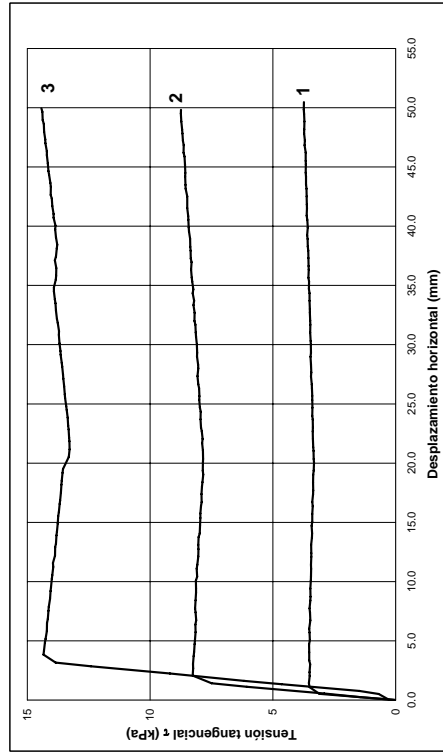
Ensayo Nº:34

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	150		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

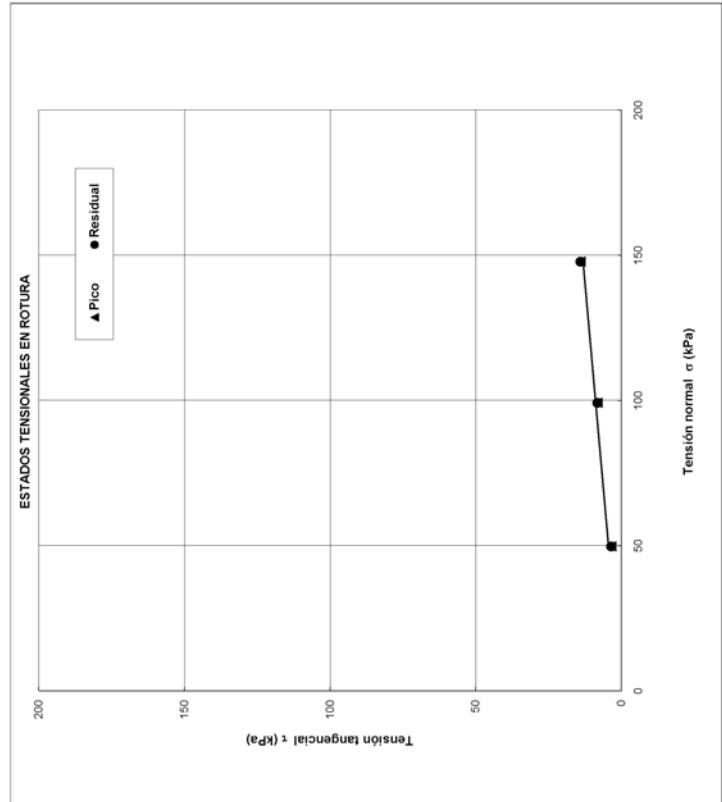
Ensayo Nº:34

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomembrana

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	150		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	3.49	8.16	14.07		
T. tang. residual τ_r (kPa)	3.49	8.16	14.07		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Epesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Epesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5.000	5.000	5.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 35

Fecha: 06/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante

Geosintético: Geocompuesto drenante GC3

Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Distribución de Cargas (geored)

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, 13.5 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

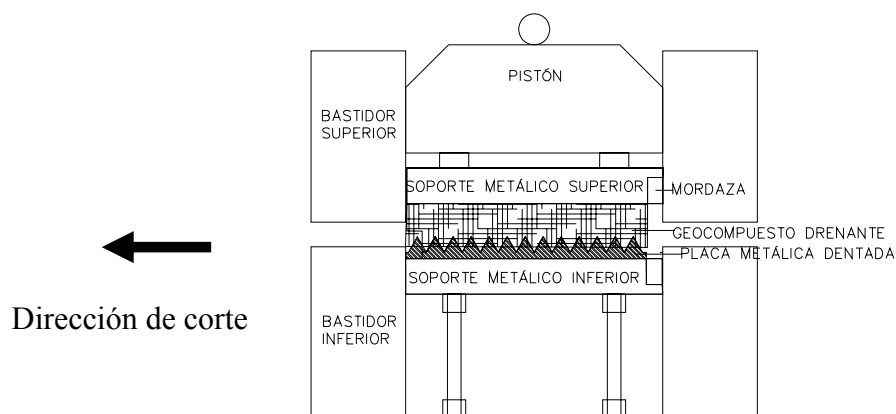
Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:35

MUESTRA : Geocompuesto drenante

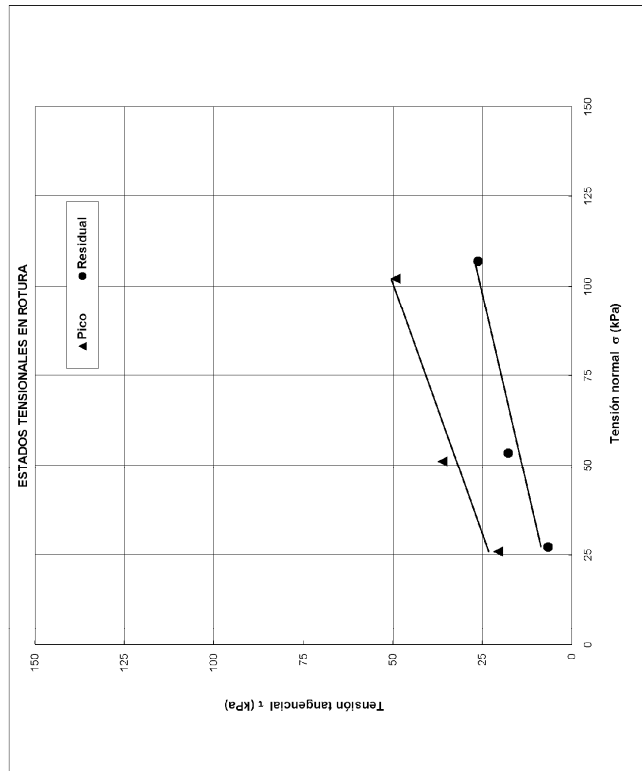
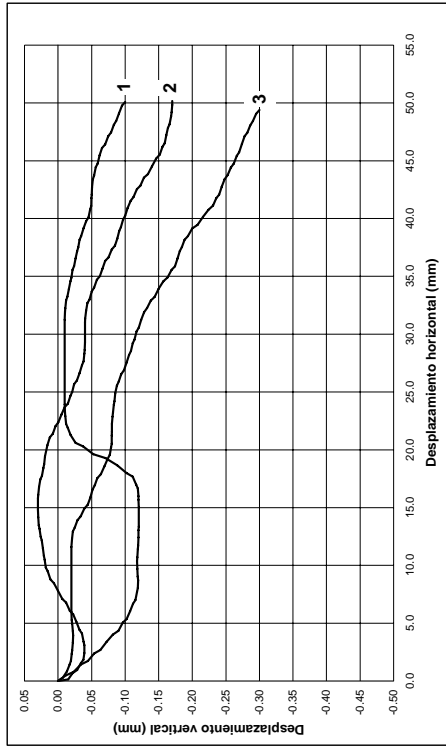
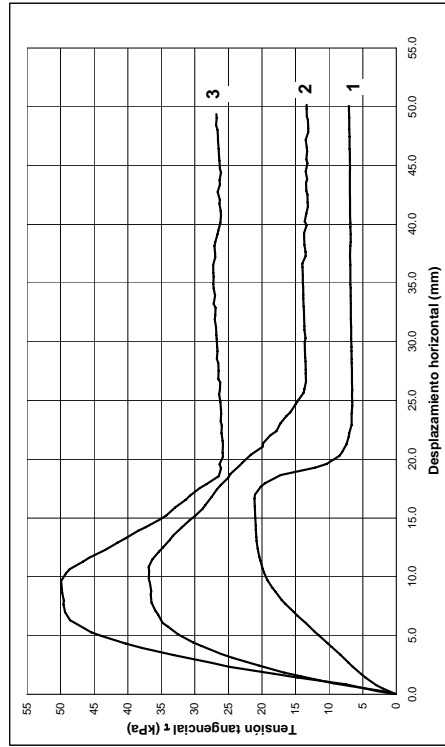
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	20.59	36.09	49.19		
T. tang. residual τ_r (kPa)	6.85	17.72	26.20		
Geosintético superior	GC				
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor: t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Humedad inicial, w _i (%)					
Humedad final, w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	710.0	710.0	710.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior					
Lado L ₁ (mm)					
Lado L ₂ (mm)					
Espesor: t (mm)					
Humedad inicial, w _i (%)					
Humedad final, w _f (%)					
Masa por unidad de área, m (g/m ²)					
V. de ensayo (mm/min)					

MUESTRA: Geocompuesto drenante

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 36

Fecha: 08/10/2006

Muestra: Geocompuesto drenante

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Dirección de ensayo del material:
Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD).

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 2.50 kN, 13.50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

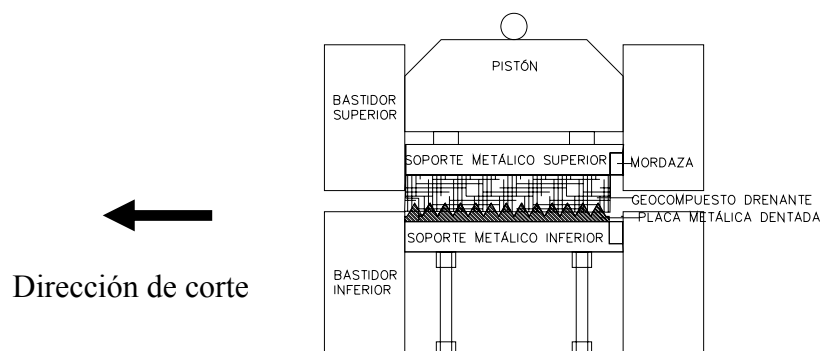
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa

Esquema:



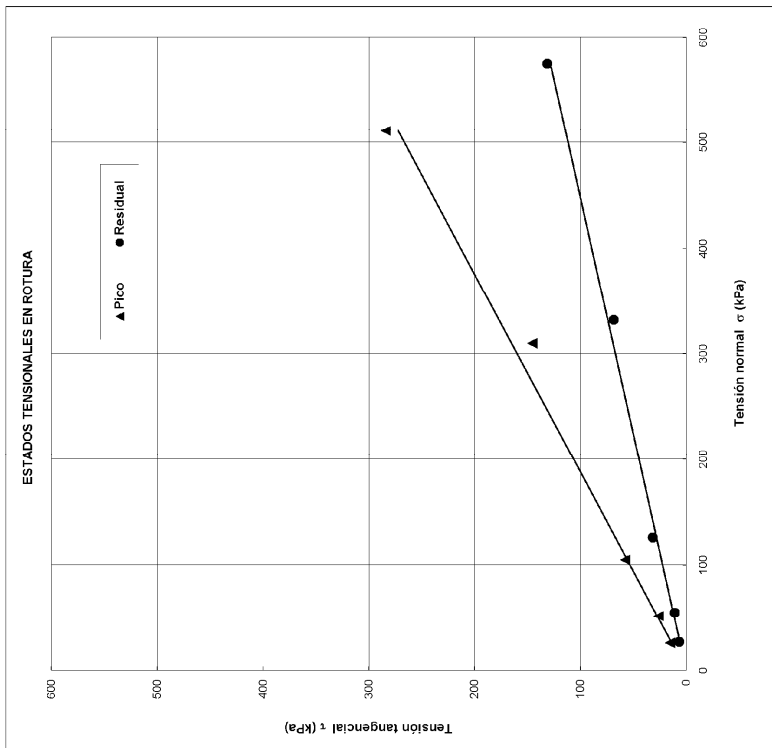
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:36

MUESTRA: Geocompuesto drenante

TIPO DE ENSAYO: SECO

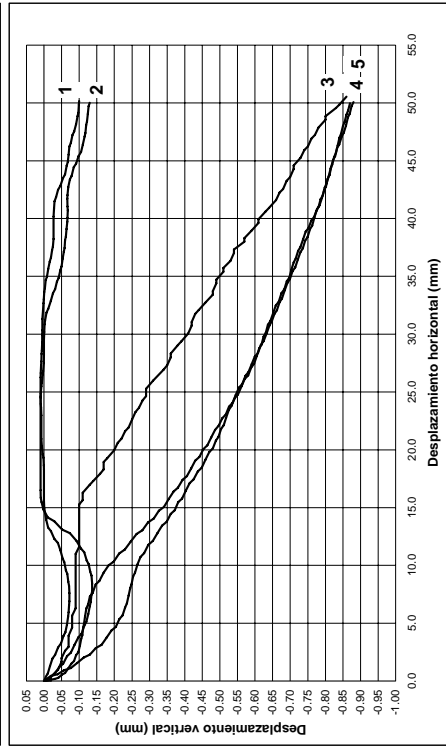
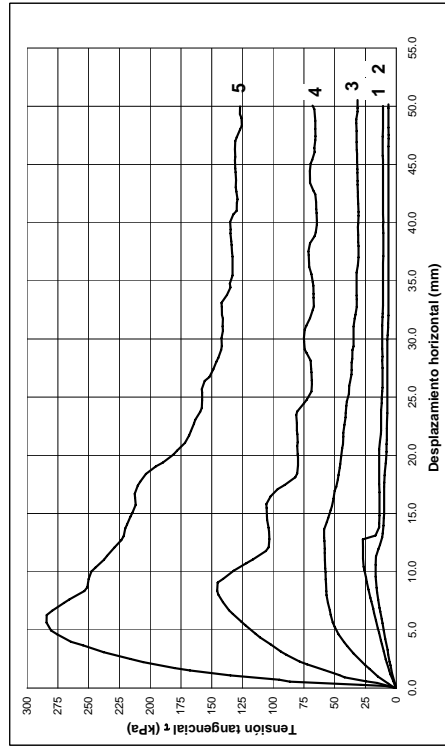
Probeta Nº:	1	2	3	4	5	6
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	300	500	500
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	15.46	28.13	57.62	145.52	284.21	284.21
T. tang. residual, τ_r (kPa)	6.70	10.89	31.41	68.52	131.13	131.13
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Geosintético superior						
Lado, L_v (mm)	300.0	300.0	197.0	282.0	282.0	282.0
Lado, L_h (mm)	282.0	282.0	180.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0



MUESTRA: Geocompuesto drenante

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	300	500



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 37

Fecha: 14/02/2007

Muestra: SUELO/GEOTEXTIL

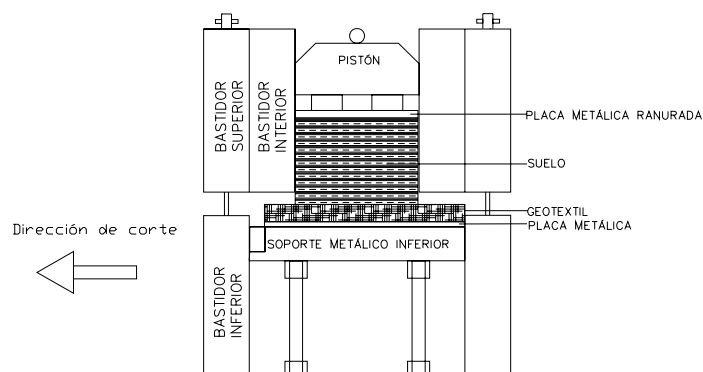
Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Próctor normal
 Densidad máxima: 1.74 (t/m³)
 Humedad óptima: 17.50 (%)

Geosintético: Geotextil GT4
 Función: Protección de geomembranas y separación entre capas.

Dirección de ensayo del material:
 Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:
 Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:
 Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)
 Métodos de sujeción de los geosintéticos:
 Geotextil pegado a soporte inferior y sujeto con mordaza.

Esquema:

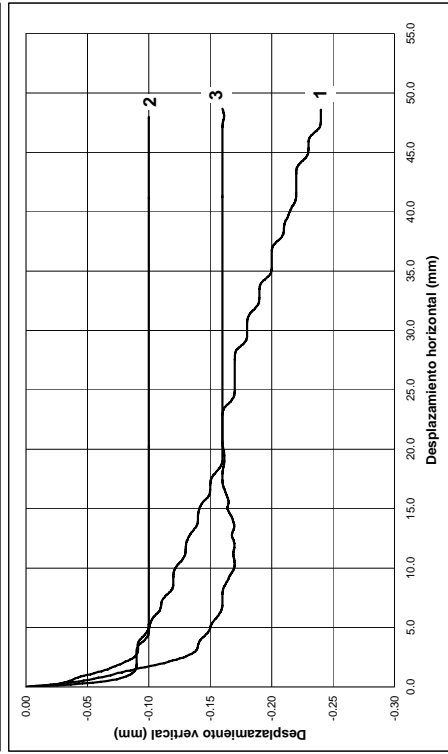
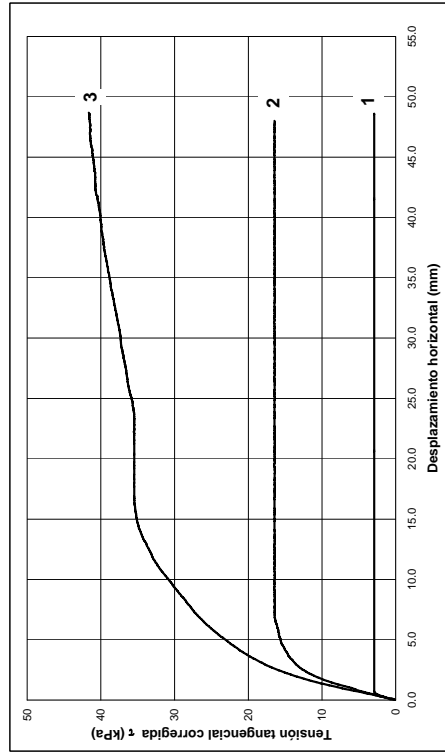


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:37

MUESTRA: Suelo/Geotextil TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		

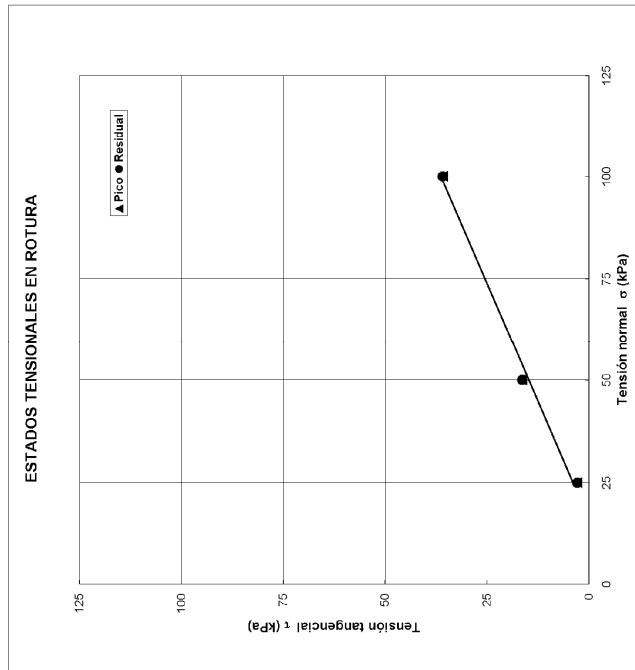


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:37

MUESTRA: Suelo/Geotextil TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	2.93	16.50	35.66		
T. tang. residual τ_r (kPa)	2.90	16.38	35.90		
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1		
Lado L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial w _i (%)	17.48	17.48	17.48		
Humedad final w _f (%)	18.00	18.00	18.00		
Densidad seca ρ_s (kN/m ³)	1.75	1.78	1.78		
Geosintético interior	G1	G1	G1		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor t (mm)	1.0	1.0	1.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	160.0	160.0	160.0		
v. de ensayo (mm/min)	1.000	1.000	1.000		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 38

Fecha: 02/05/2007

Muestra: SUELO/GEOTEXTIL

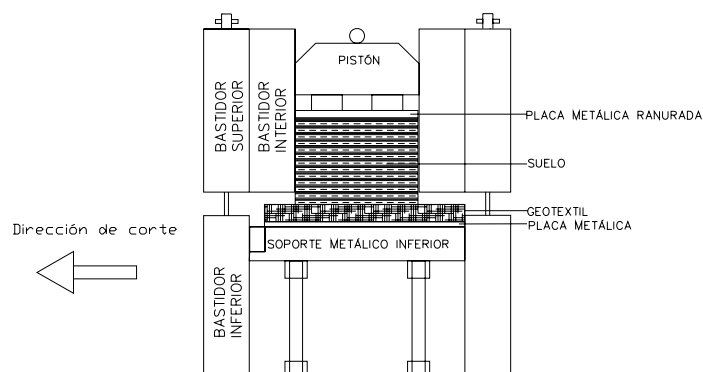
Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Próctor normal
 Densidad máxima: 1.74 (t/m³)
 Humedad óptima: 17.50 (%)

Geosintético: Geotextil GT5
 Función: Protección de geomembranas y separación entre capas.

Dirección de ensayo del material:
 Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:
 Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:
 Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)
 Métodos de sujeción de los geosintéticos:
 Geotextil pegado a soporte inferior y sujeto con mordaza.

Esquema:



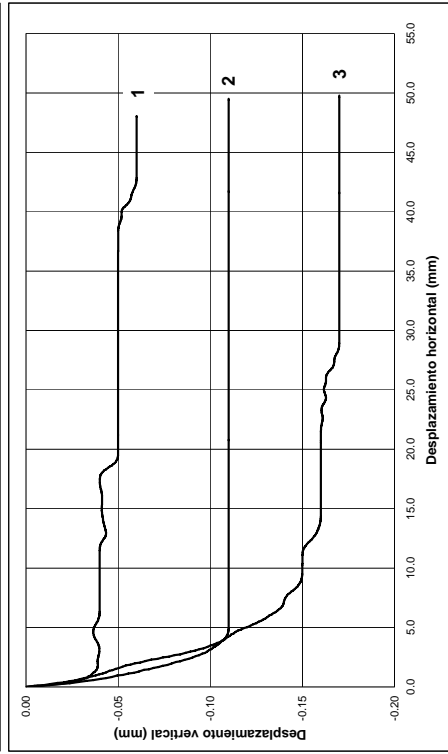
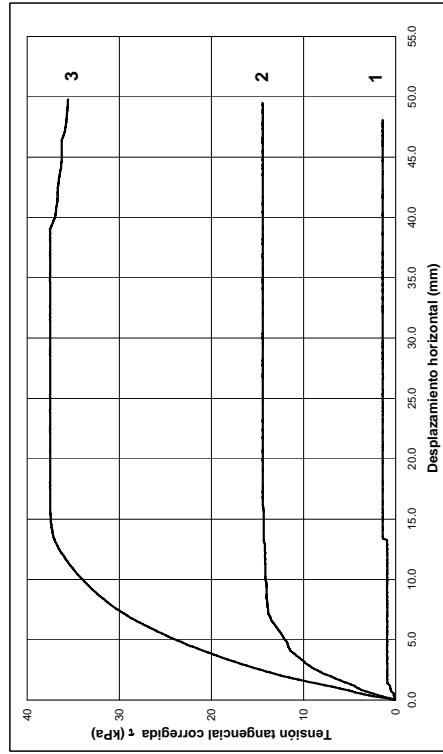
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo Nº:38

MUESTRA: Suelo/Geotextil TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



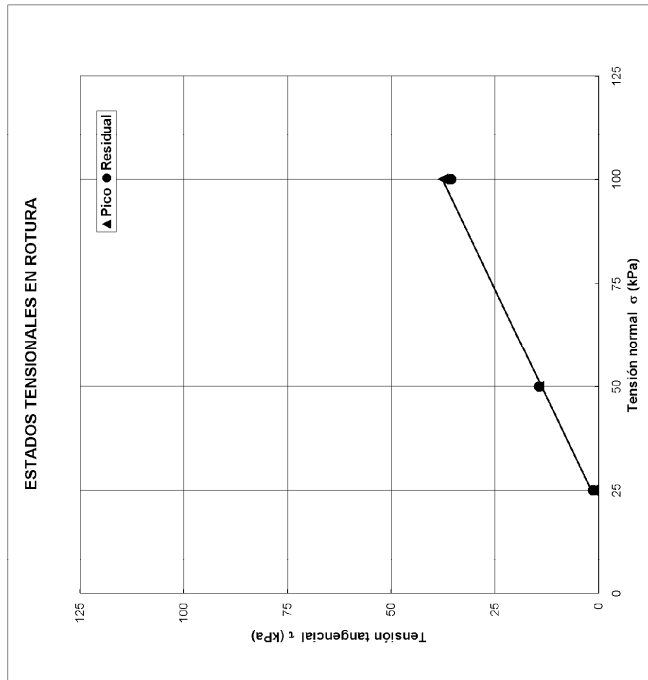
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:38

MUESTRA: Suelo/Geotextil TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	1.43	14.45	37.53		
T. tang. residual, τ_r (kPa)	1.38	14.40	35.55		
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1		
Lado, L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado, L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto, H (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w _i (%)	17.49	17.49	17.49		
Humedad final, w _f (%)	16.00	16.00	16.00		
Densidad seca, γ_d (kN/m ³)	1.78	1.78	1.78		
Geosintético interior	GT	GT	GT		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	1.8	1.8	1.8		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	150.0	150.0	150.0		
V. de ensayo (mm/min)	1.000	1.000	1.000		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 39

Fecha: 07/05/2007

Muestra: SUELO/GEOTEXTIL

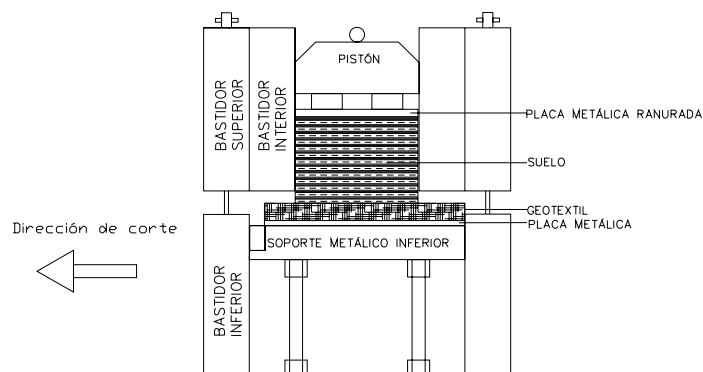
Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Próctor normal
 Densidad máxima: 1.74 (t/m³)
 Humedad óptima: 17.50 (%)

Geosintético: Geotextil GT5
 Función: Protección de geomembranas y separación entre capas.

Dirección de ensayo del material:
 Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:
 Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:
 Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)
 Métodos de sujeción de los geosintéticos:
 Geotextil pegado a soporte inferior y sujeto con mordaza.

Esquema:



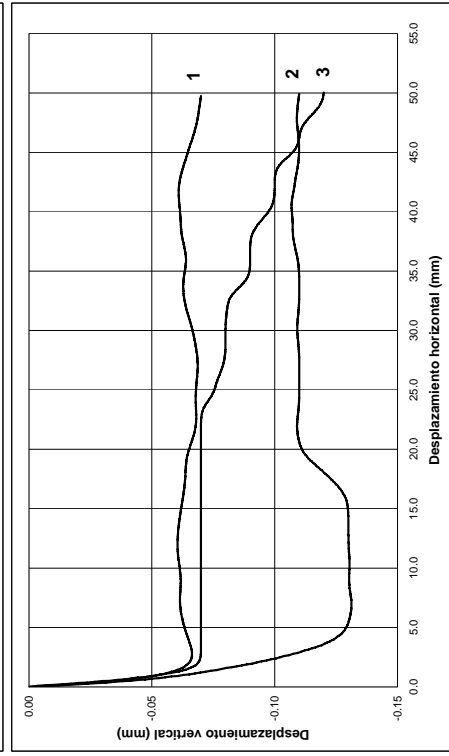
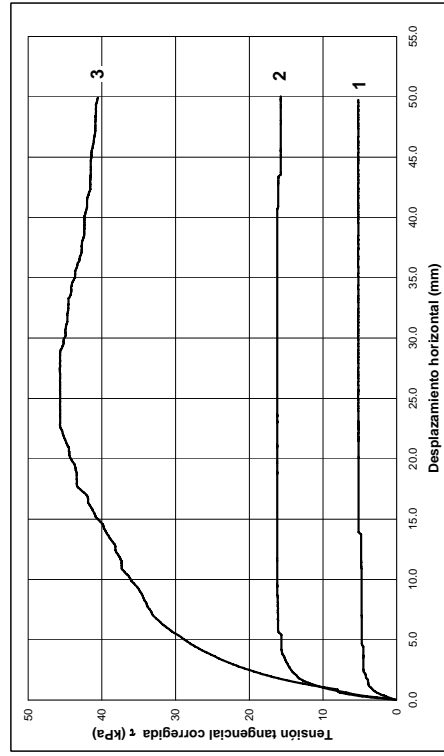
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo N°:39

MUESTRA: Suelo/Geotextil TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		



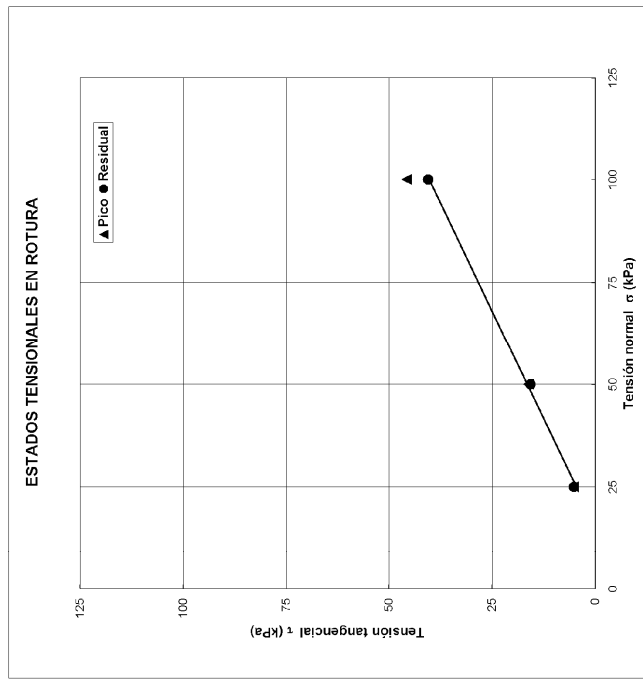
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:39

MUESTRA: Suelo/Geotextil TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	5.23	16.23	45.73		
T. tang. residual τ_r (kPa)	5.18	16.70	40.53		
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1		
Lado L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w _i (%)	17.49	17.49	17.49		
Humedad final, w _f (%)	16.97	16.87	20.37		
Densidad seca, ρ_s (kN/m ³)	1.78	1.78	1.78		
Geosintético inferior	GT	GT	GT		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	1.8	1.8	1.8		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	150.0	150.0	150.0		
V. de ensayo (mm/min)	1.000	1.000	1.000		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 40

Fecha: 15/05/2007

Muestra: SUELO/GEOTEXTIL

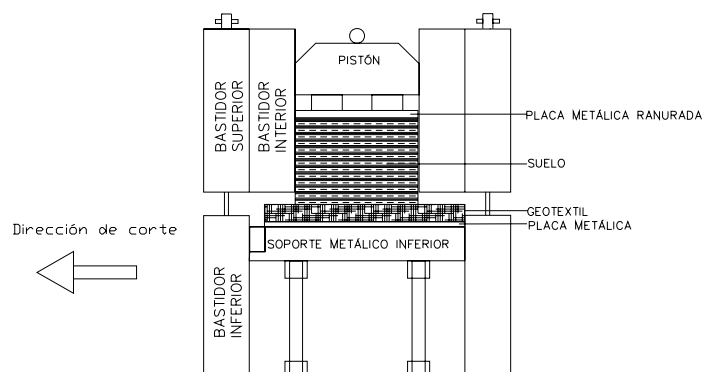
Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Próctor normal
 Densidad máxima: 1.74 (t/m³)
 Humedad óptima: 17.50 (%)

Geosintético: Geotextil GT4
 Función: Protección de geomembranas y separación entre capas.

Dirección de ensayo del material:
 Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:
 Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:
 Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)
 Métodos de sujeción de los geosintéticos:
 Geotextil pegado a soporte inferior y sujeto con mordaza.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:40

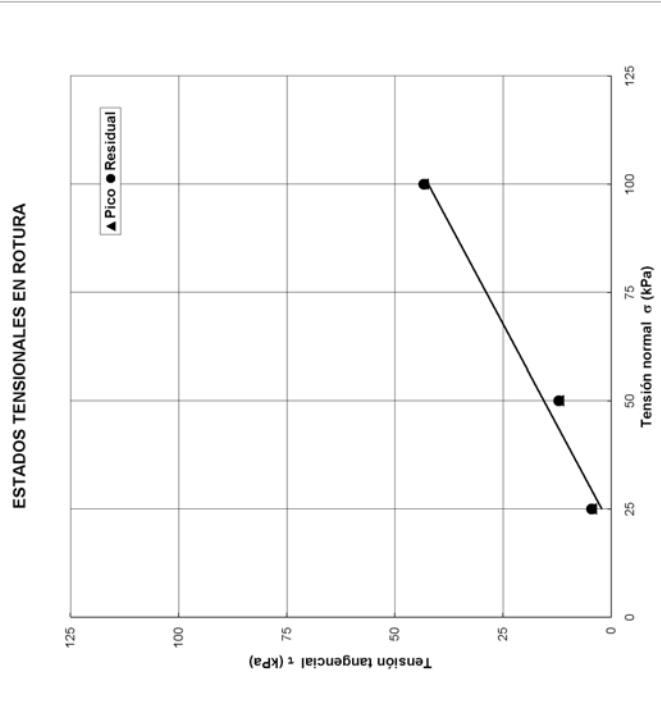
MUESTRA : Suelo/Geotextil

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

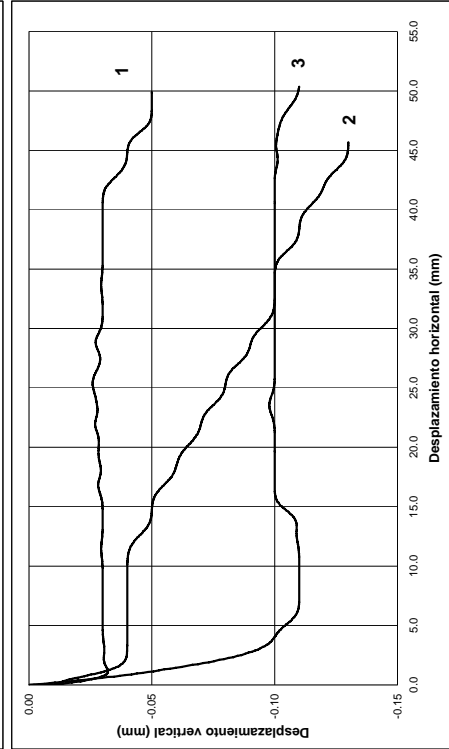
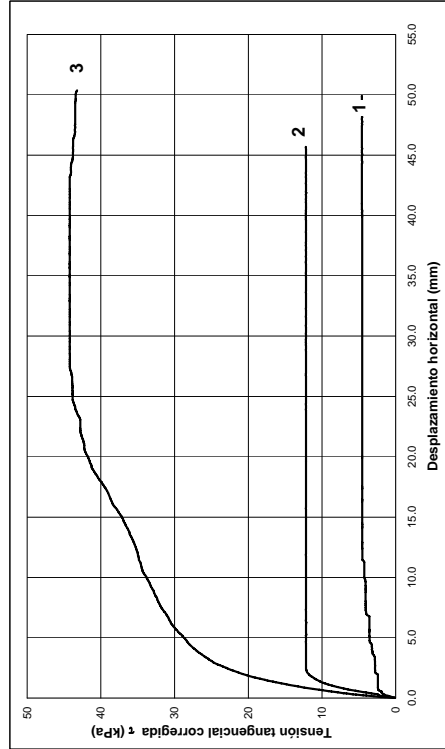
Suelo/Geotextil

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T tang. de pico τ_p (kPa)	4.58	12.18	43.50		
T tang. residual τ_r (kPa)	4.55	12.13	43.23		
Suelo	REUS	REUS	REUS		
Lado L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto, h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w _i (%)	17.49	17.49	17.49		
Humedad final, w _f (%)	23.01	16.74	16.79		
Densidad seca, γ_d (kN/m ³)	1.78	1.78	1.78		
Geosintético inferior	GT	GT	GT		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	1.0	1.0	1.0		
Masa por unidad de area, m (g/m ²)	160.0	160.0	160.0		
V. de ensayo (mm/min)	1.000	1.000	1.000		



Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



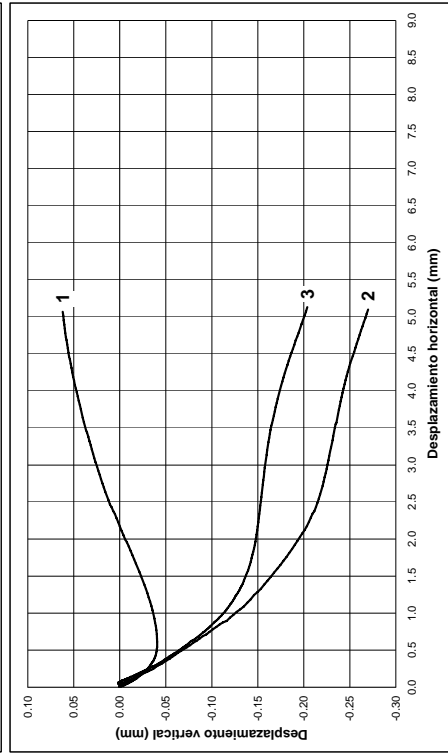
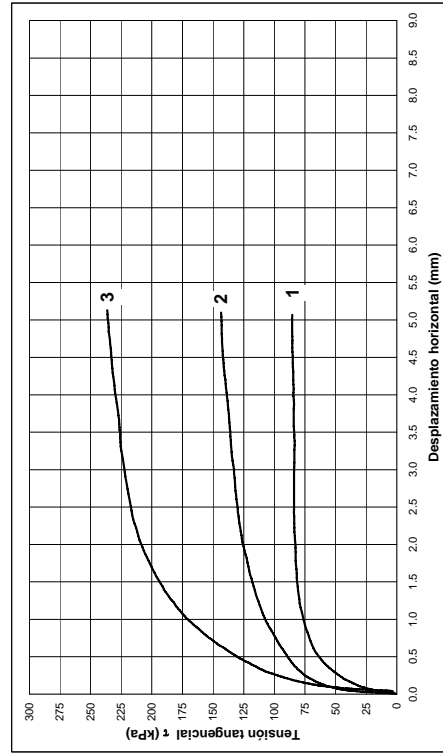
ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS

(UNE 103401:1998)

Ensayo Nº: 41

MUESTRA: COMPACTADA P. NORMAL TIPO DE ENSAYO: C-D

Probeta Nº:	1	2	3
Tensión normal σ (kPa)	100	200	300



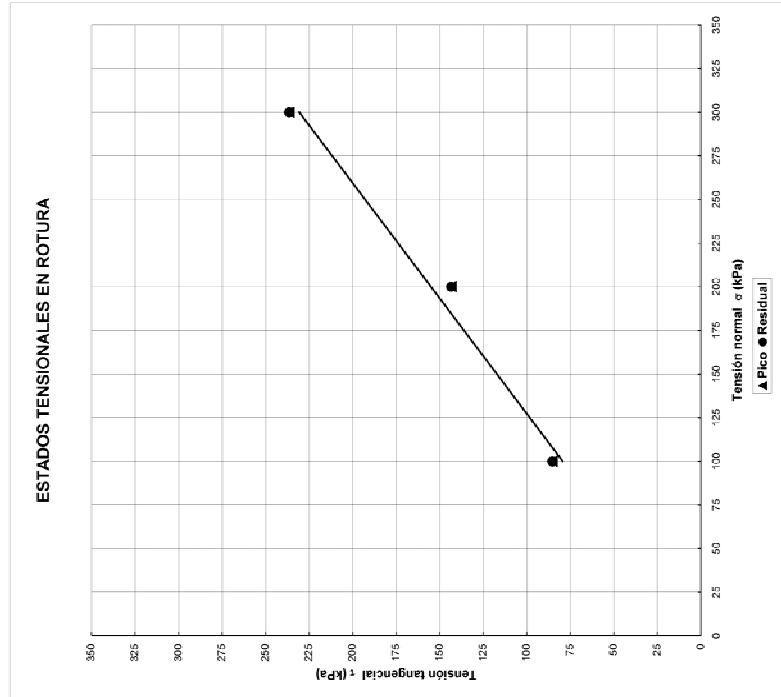
ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS

(UNE 103401:1998)

Ensayo Nº: 41

MUESTRA: COMPACTADA P. NORMAL TIPO DE ENSAYO: C-D

Probeta Nº:	1	2	3
Tensión normal σ (kPa)	100	200	300
T. rang. de pico τ_p (kPa)	85.50	143.50	236.50
T. rang. residual τ_r (kPa)	85.30	143.50	236.50
Dímetro, d (mm)	50.0	50.0	50.0
Lado, L_1 (mm)			
Lado, L_2 (mm)	29.1	29.1	29.1
Alto, h (mm)	19.98	20.80	20.76
Humedad inicial, w (%)	21.46	21.10	19.46
Humedad final, w_f (%)	1.70	1.69	1.74
Densidad seca, γ_d (g/cm ³)	0.006	0.006	0.006
V. de ensayo, v_e (mm/min)			



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 42

Fecha: 16/05/2007-28/05/2007

Muestra: SUELO/GEOMEMBRANA

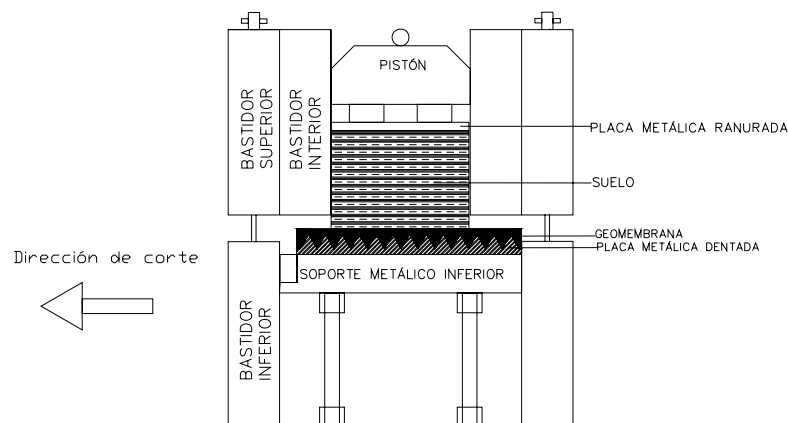
Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Proctor modificado
 Densidad máxima: 1.92 (t/m³)
 Humedad óptima: 12 (%)

Geosintético: Geomembrana GM_L
 Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:
 Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:
 Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 2.50 kN, 5 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:
 Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)
 Métodos de sujeción de los geosintéticos:
 Geomembrana colocada sobre superficie rugosa.

Esquema:



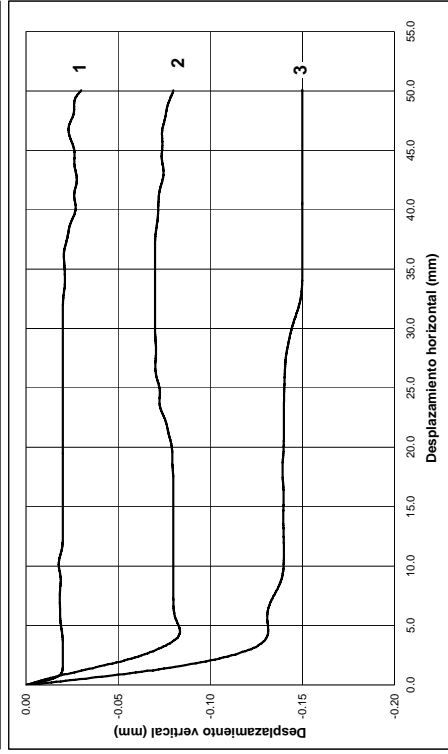
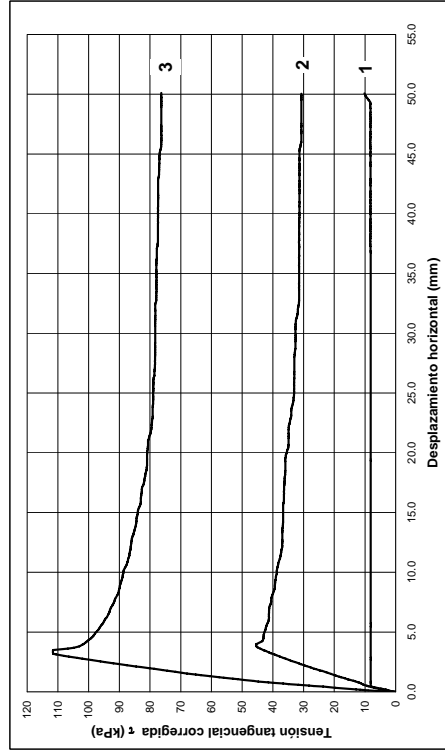
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo N°:42

MUESTRA: Suelo/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		



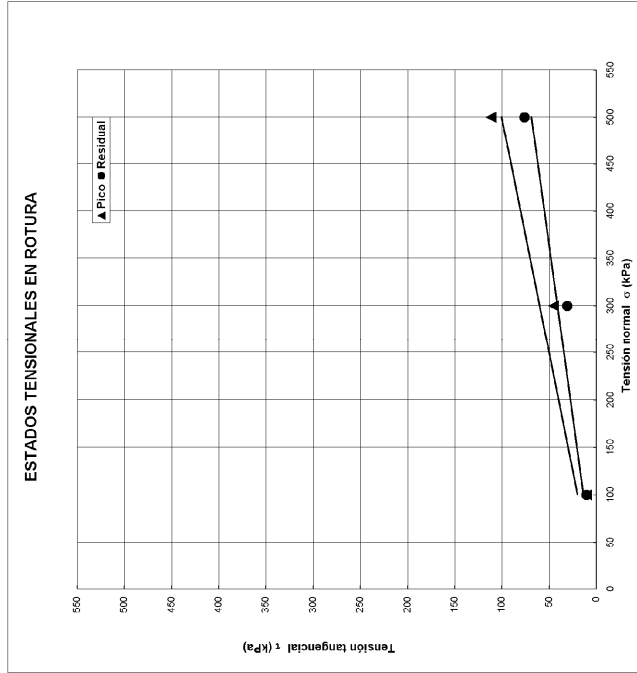
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:42

MUESTRA: Suelo/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	300	100		
T. fmg. de succ. τ_u (kPa)	10.18	45.45	111.60		
T. fmg. residual τ_r (kPa)	10.18	30.65	76.28		
Suelo	SUBEC1	SUBEC1	SUBEC1		
Lado L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto. h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w _i (%)	12.00	12.00	12.00		
Humedad final, w _f (%)	12.00	12.00	12.00		
Densidad seca, ρ_d (kN/m ³)	1.96	1.96	1.96		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	1.000	1.000	1.000		
V. de ensayo (mm/min)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 43

Fecha: 29/05/2007-04/06/2007

Muestra: SUELO/GEOMEMBRANA

Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Proctor modificado
 Densidad máxima: 1.92 (t/m³)
 Humedad óptima: 12 (%)

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}
 Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 2.50 kN, y 13.5 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

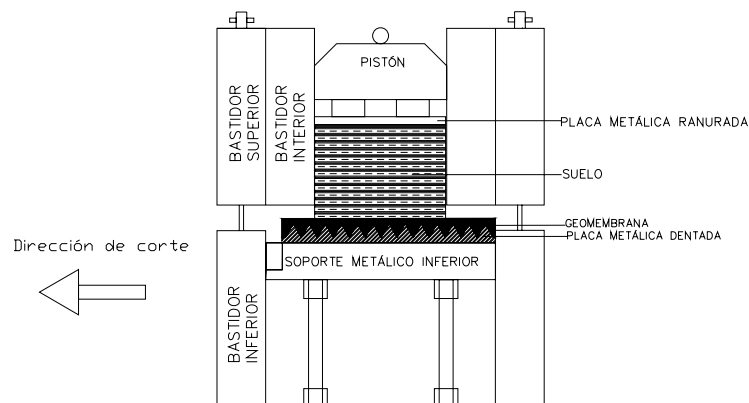
Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geomembrana atornillada sobre superficie rugosa.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:43

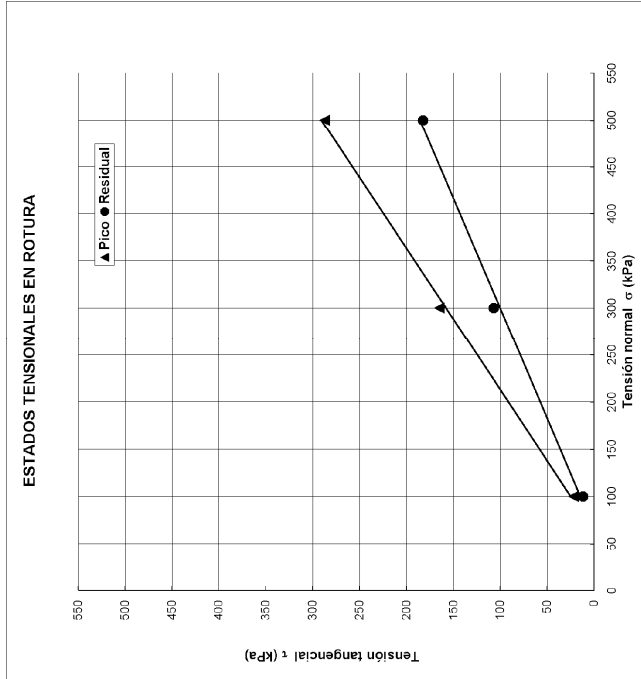
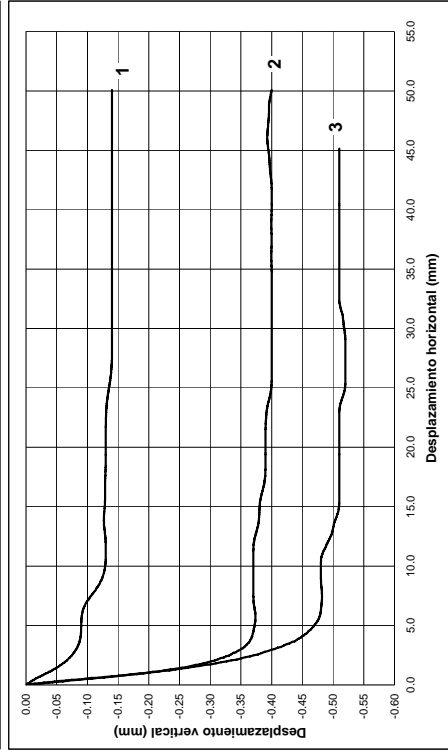
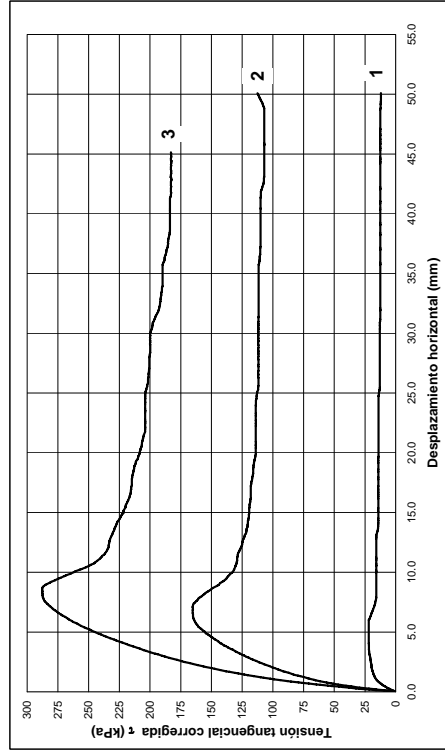
MUESTRA: Suelo/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	21.90	165.25	287.50		
T. tang. residual τ_r (kPa)	11.93	106.75	182.50		
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1		
Lado, L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado, L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto, h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w _i (%)	12.00	12.00	12.00		
Humedad final, w _f (%)	12.00	12.00	12.00		
Densidad seca, γ_d (kN/m ³)	1.96	1.96	1.96		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	1.000	1.000	1.000		
V. de ensayo (mm/min)					

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 44

Fecha: 13/06/2007

Muestra: GCL/GEOMEMBRANA

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCLnw
Función: Impermeabilización

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

GM: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.5, 5 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

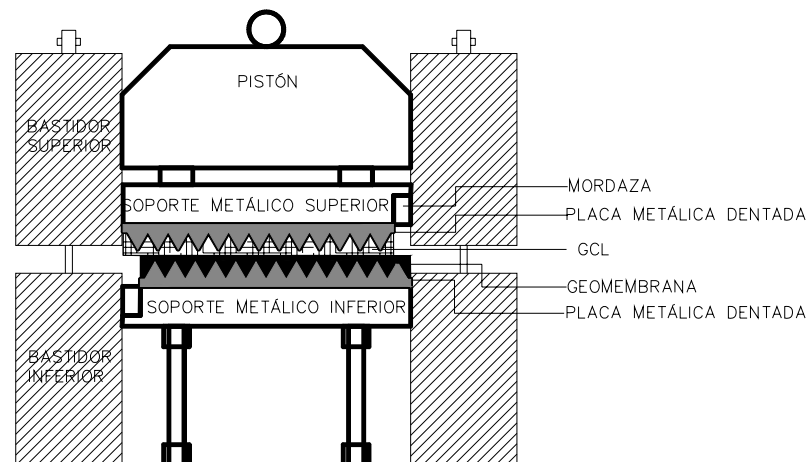
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa y amordaza al soporte rígido superior.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa y atornillada

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

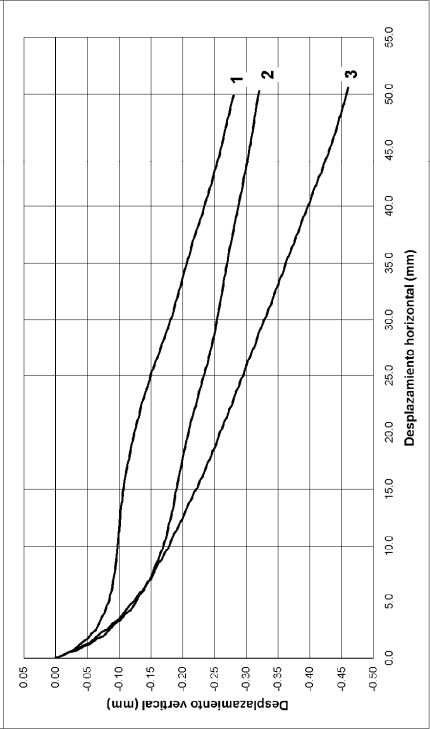
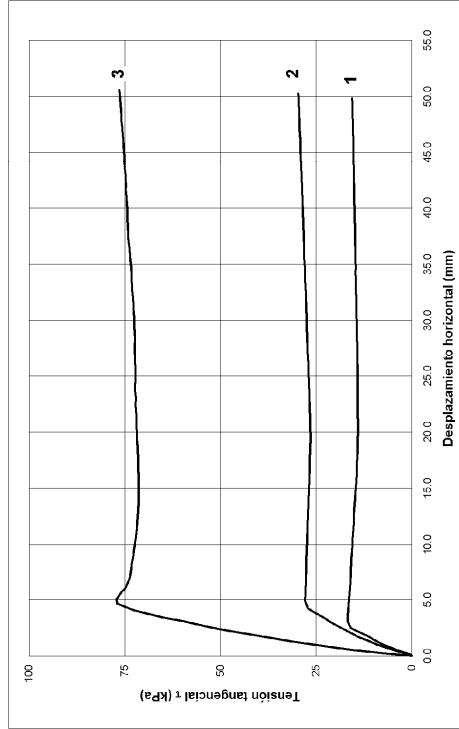
ASTM D5321-02

Ensayo N°: 44

MUESTRA: GCL/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

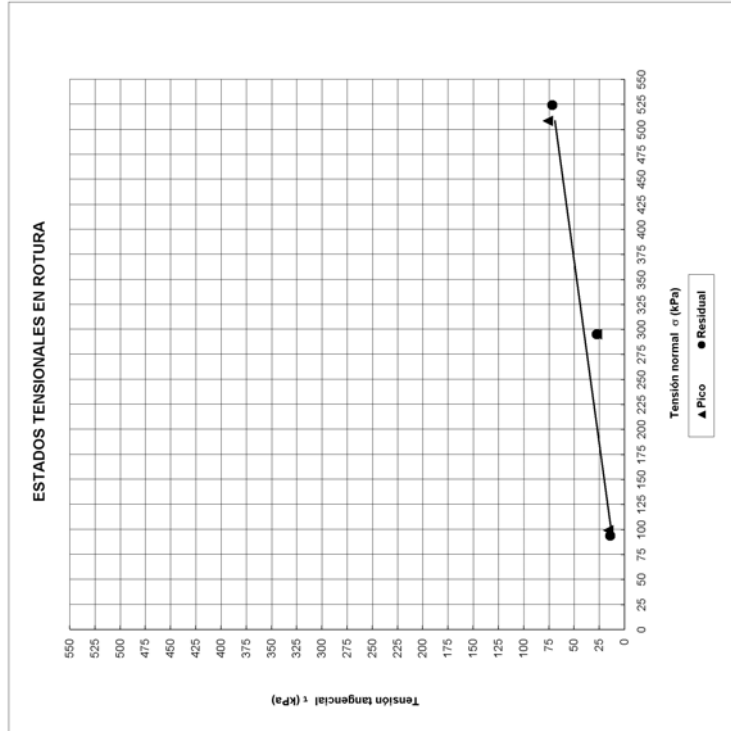
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 44

MUESTRA: GCL/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	16.22	27.45	76.23		
T. tang. residual τ_r (kPa)	14.26	27.45	71.43		
V. de ensayo (mm/min)	5.0000	5.0000	5.0000		
Geosintético superior	GCL1	GCL1	GCL1		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	5	5	5		
Humedad inicial, w _i (%)	11.5	11.5	11.5		
Humedad final, w _f (%)	11.5	11.5	11.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 45

Fecha: 15/06/2007

Muestra: GCL/GEOMEMBRANA

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCLnw
Función: Impermeabilización

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

GM: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 15, 50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

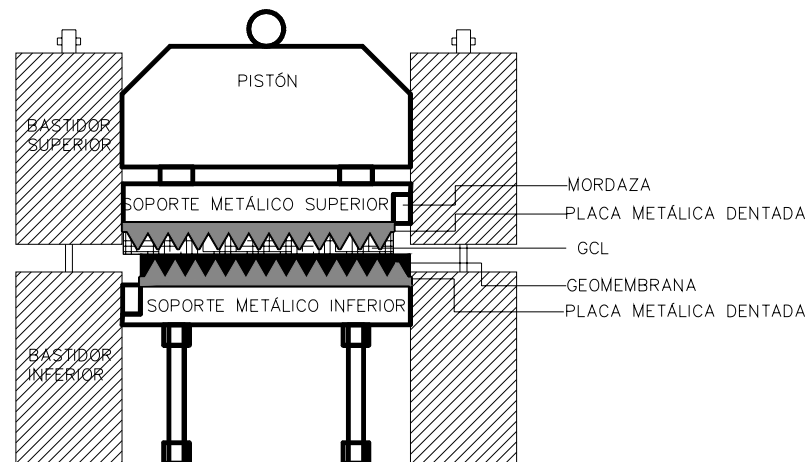
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa y atornillada

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

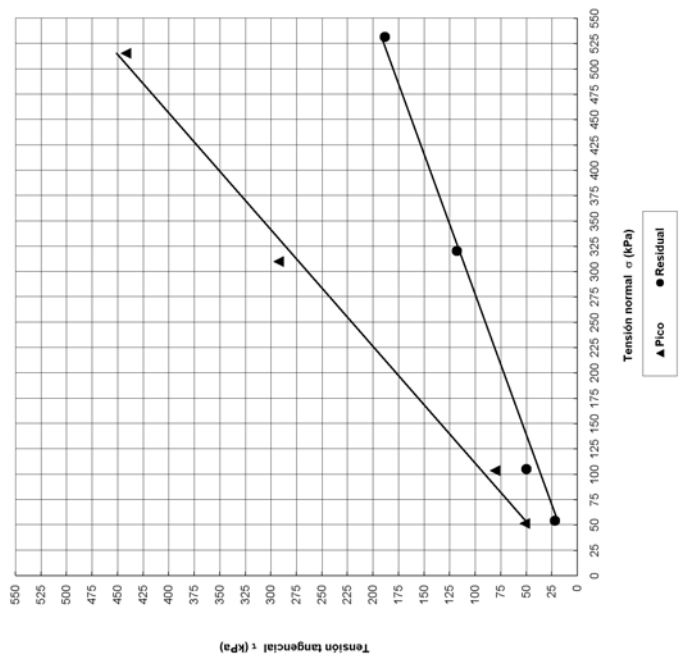
Ensayo N°: 45

MUESTRA: GCL/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	300	500	500
T. tang. de pico τ_p (kPa)	51.42	80.52	282.52	441.76	441.76
T. tang. residual τ_r (kPa)	21.88	49.69	117.89	188.22	188.22
V. de ensayo (mm/min)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Geosintético superior	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	5	5	5	5	5
Humedad inicial, w _i (%)	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Humedad final, w _f (%)	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
Geosintético inferior	GM	GM	GM	GM	GM
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

ESTADOS TENSIONALES EN ROTURA



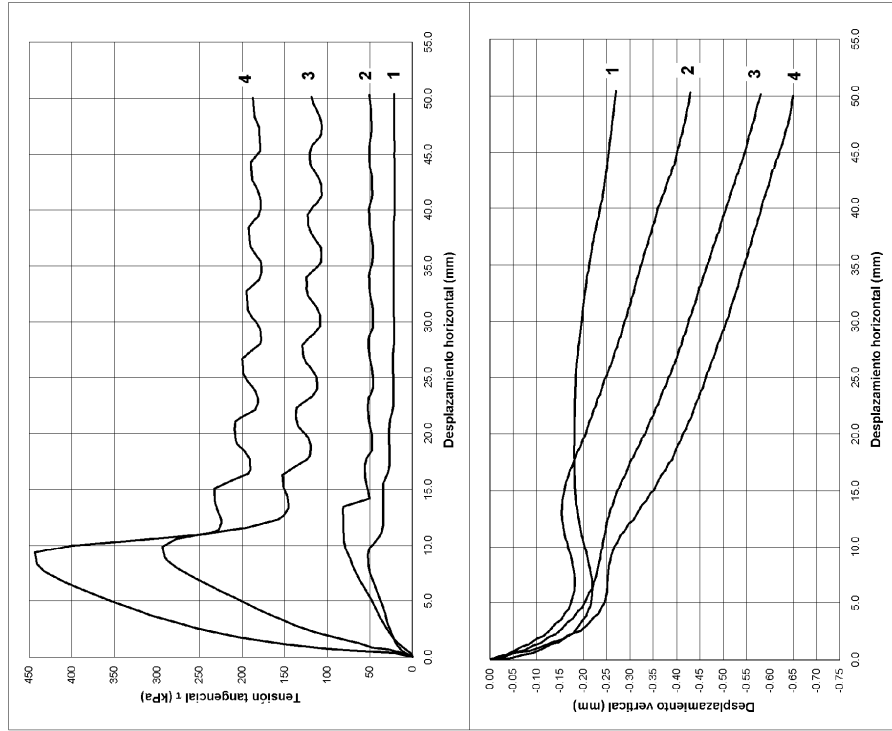
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 45

MUESTRA: GCL/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	300	500	500



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 46

Fecha: 18/06/2007

Muestra: GCL/GEOMEMBRANA

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCLnw
Función: Impermeabilización

Geosintético: Geomembrana GM_L
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

GM: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.5, 5 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

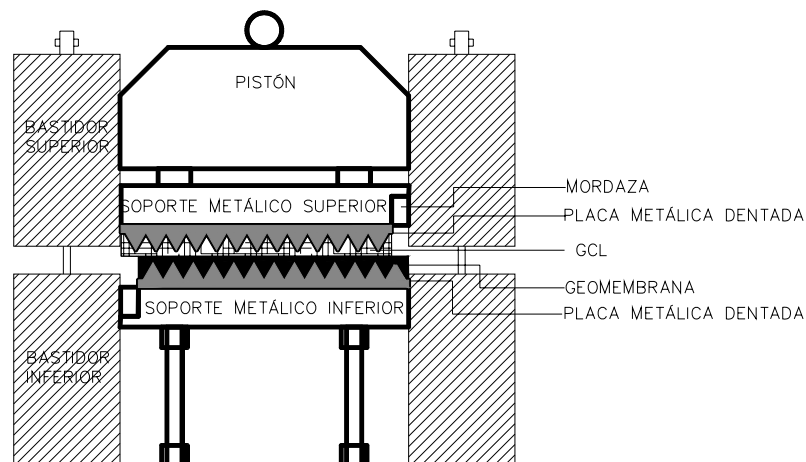
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa y amordaza al soporte rígido superior.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa y atornillada

Esquema:



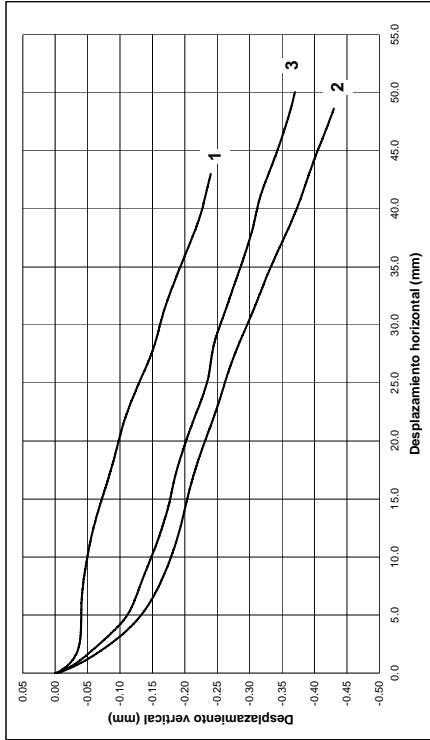
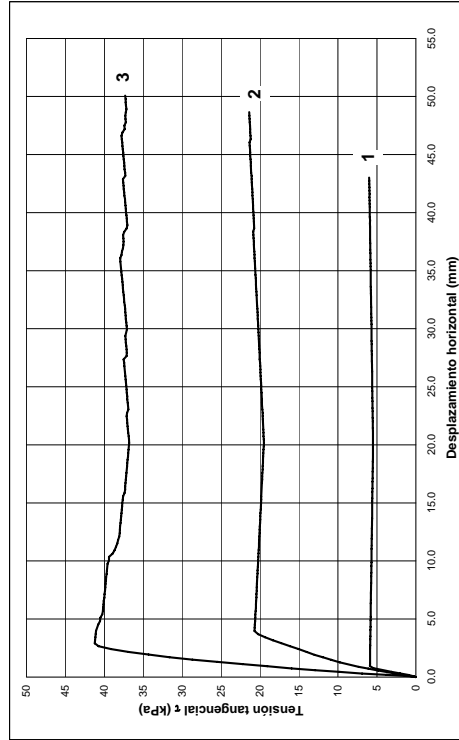
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 46

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		



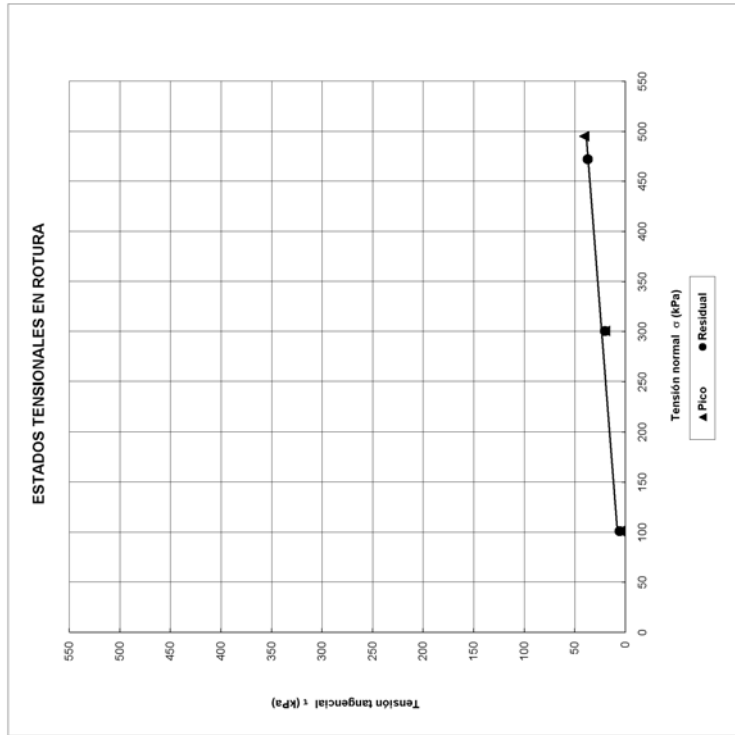
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 46

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	6.85	20.32	41.01		
T. tang. residual τ_r (kPa)	6.85	20.32	37.10		
V. de ensayo (mm/min)	0.0550	0.0550	0.0550		
Geosintético superior	GCL1	GCL1	GCL1		
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor GCL hidratada, t_h (mm)	8-10	8-10	8-10		
Humedad inicial (fase hidratación), w(%)	154.4	153.3	188.5		
Humedad final, w(%)	129.3	120.5	100.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 47

Fecha: 21/06/2007

Muestra: Geocompuesto drenante/Geomalla

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored)

Geosintético: Geomalla GMalla1
Función: Refuerzo

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara: geotextil
200 gr/m²

Geomalla: Dirección de fabricación (MD). Cara: barras más anchas en
contacto con el geocompuesto drenante.

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

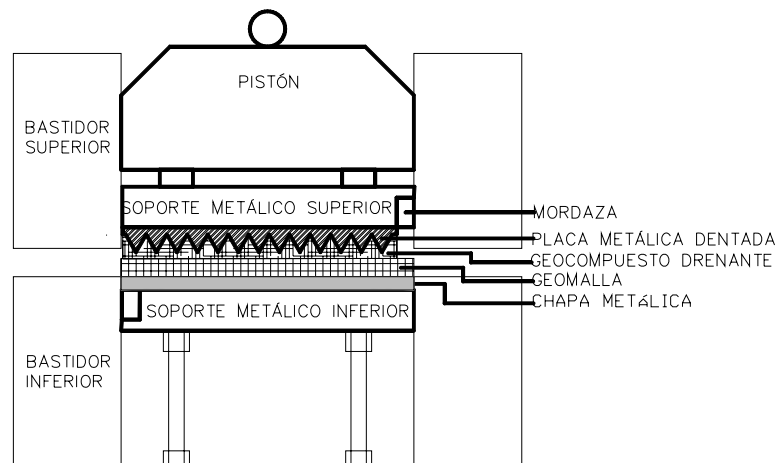
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto
con mordaza.

Geomalla pegada con resina epoxy (LANKO 720 EPOKOL D
CONJUNTO) sobre chapa metálica

Esquema:

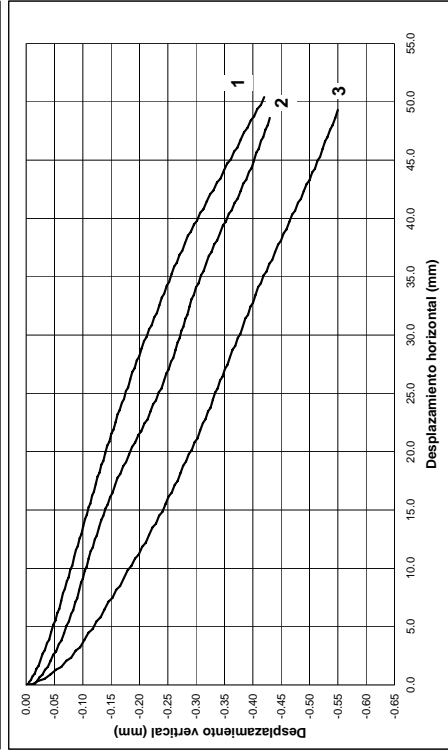
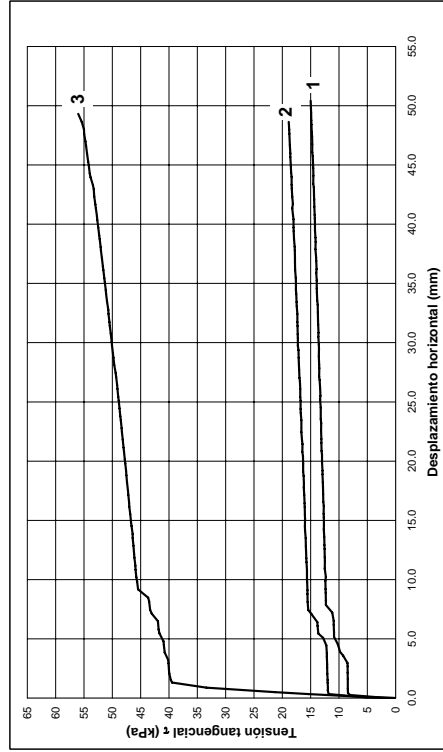


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm ASTM D5321-02

Ensayo N°:47-1 (geodren no hace contacto con la chapa metálica soporte de la geomalla)

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomalla TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:47-1 (geodren no hace contacto con la chapa metálica soporte de la geomalla)

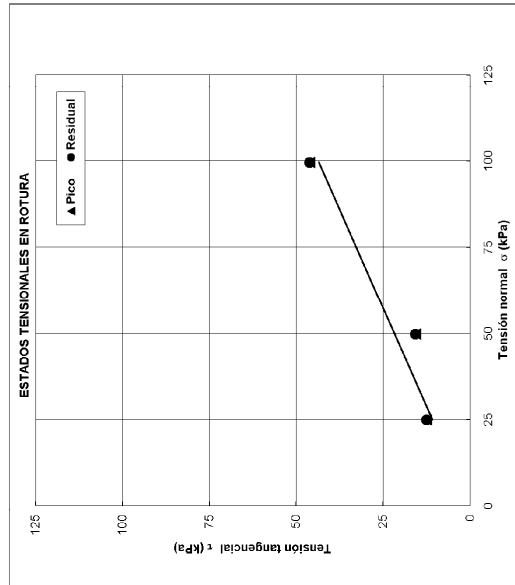
MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomalla TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	12.49	15.75	46.17		
T. tang. residual τ_r (kPa)	12.49	15.75	46.17		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GMALLA	GMALLA	GMALLA		
Lado L ₁ (mm)	253.0	253.0	253.0		
Lado L ₂ (mm)	250.0	250.0	250.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	580.0	580.0	580.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		

Pico Residual

Adhesión, c_a (kPa) 0.0 0.0

Ángulo de rozamiento, ϕ (°) 24 24

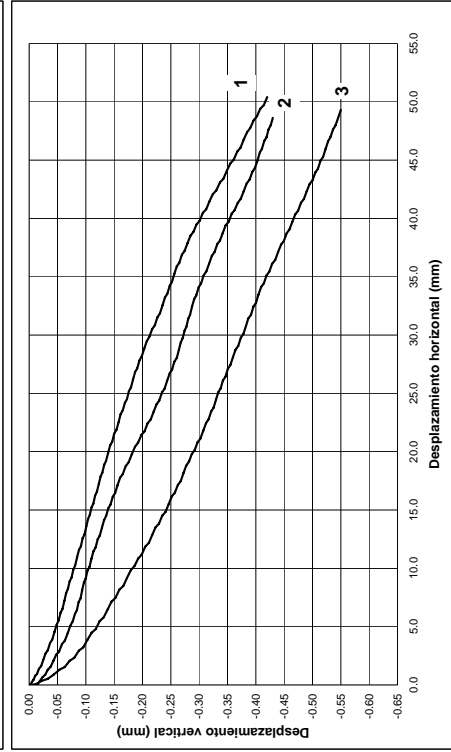
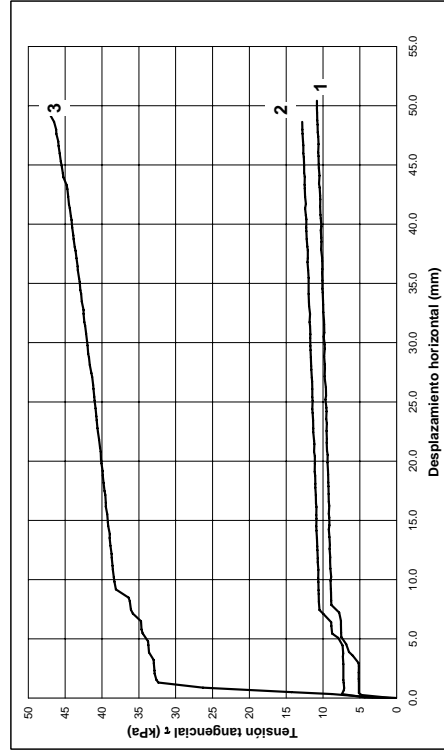


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°-47-2 (geodren hace contacto con chapa metálica soporte soporte de geomalla)

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomalla TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



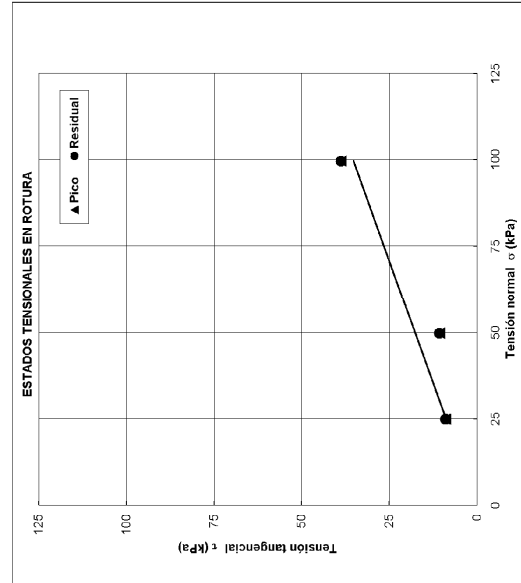
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°-47-2 (geodren hace contacto con chapa metálica soporte soporte de geomalla)

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Geomalla TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	9.02	10.72	38.75		
T. tang. residual, τ_r (kPa)	9.02	10.72	38.75		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L_2 (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GMALLA	GMALLA	GMALLA		
Lado, L_1 (mm)	253.0	253.0	253.0		
Lado, L_2 (mm)	250.0	250.0	250.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	980.0	980.0	980.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		

Pico Residual
Adhesión, c_a (kPa) 0.0 0.0
Ángulo de rozamiento, ϕ (°) 20 20



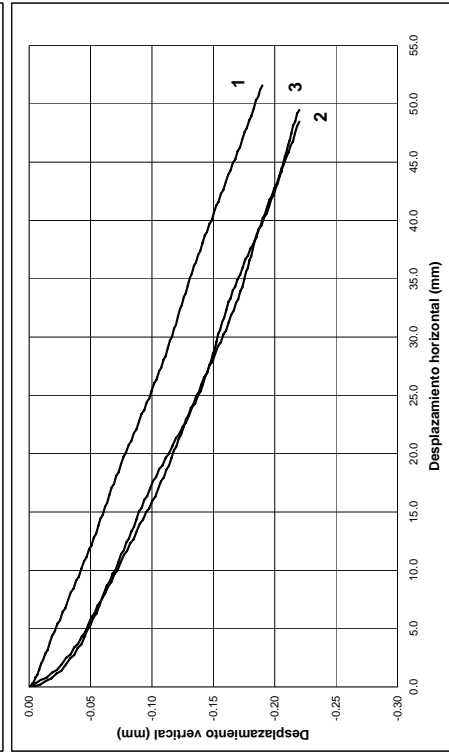
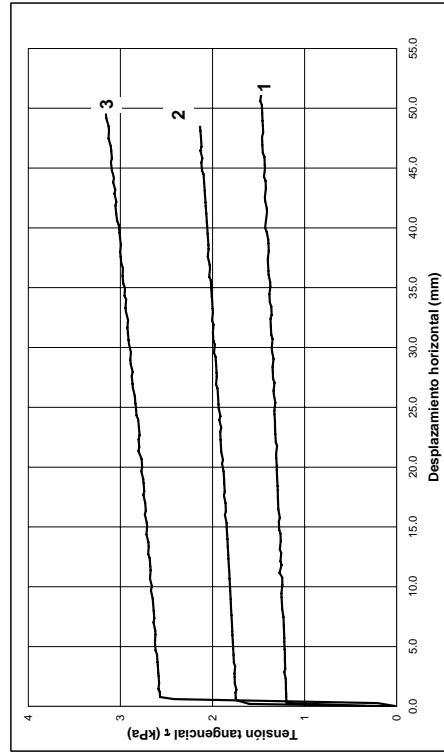
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:48

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Chapa metálica soporte de la geomalla TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

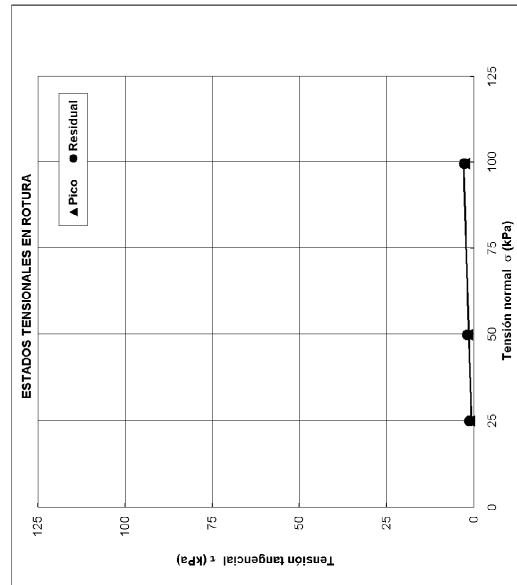
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:48

MUESTRA: Geocompuesto drenante/Chapa metálica soporte de la geomalla TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	1.26	1.82	2.69		
T. tang. residual, τ_r (kPa)	1.26	1.82	2.69		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético inferior	GMALLA	GMALLA	GMALLA		
Lado L ₁ (mm)	253.0	253.0	253.0		
Lado L ₂ (mm)	250.0	250.0	250.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	580.0	580.0	580.0		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		

Adhesión, c_a (kPa) Pico Residual
 0.0 0.0
 Ángulo de rozamiento, ϕ (°) 2 2



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 49

Fecha: 24/06/2007

Muestra: Geocompuesto drenante/GCL

Geosintético: Geocompuesto drenante GC1
Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (geored).

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCLnw
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada: geotextil 200 gr/m²
GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido.

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 2.50, 15 y 50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

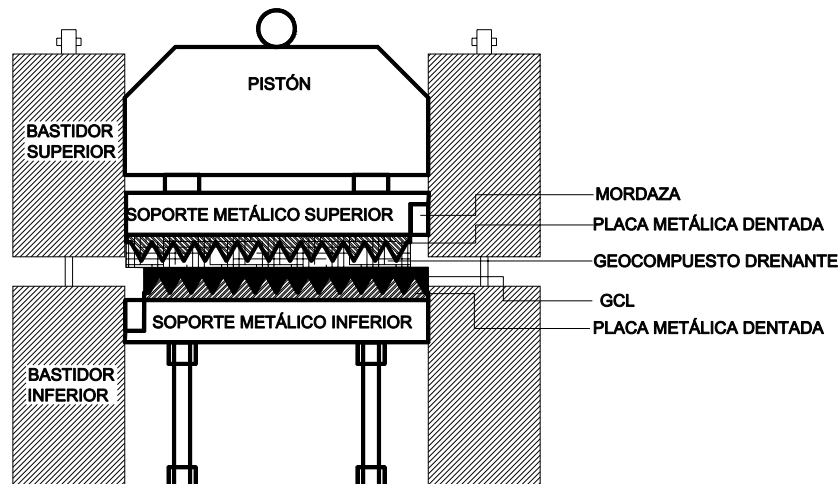
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y amordazo al soporte rígido superior

GCL colocada sobre superficie rugosa inferior.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:49

MUESTRA: Geocompuesto drenante/GCL

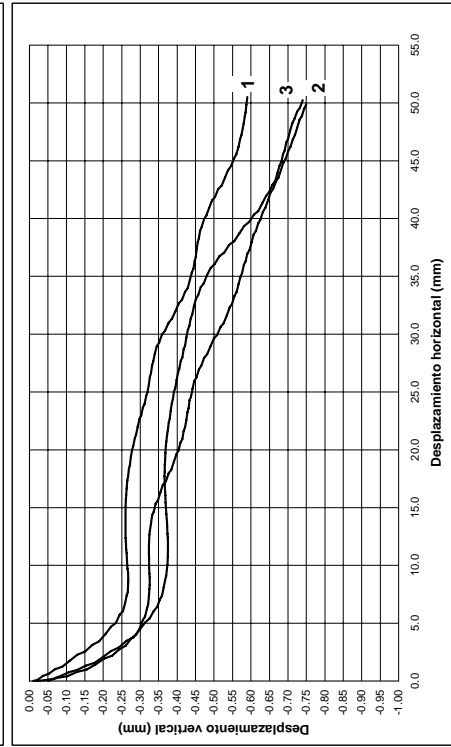
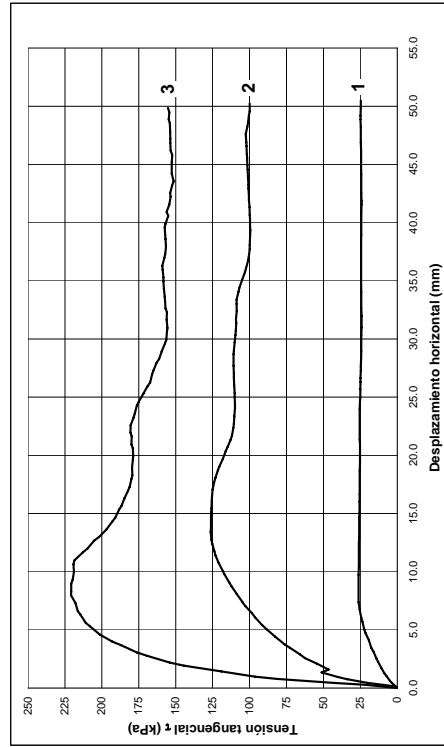
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	26.95	128.60	219.85		
T. tang. residual τ_r (kPa)	26.95	100.71	164.59		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		
Geosintético inferior	GCL	GCL	GCL		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		

MUESTRA: Geocompuesto drenante/GCL

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		



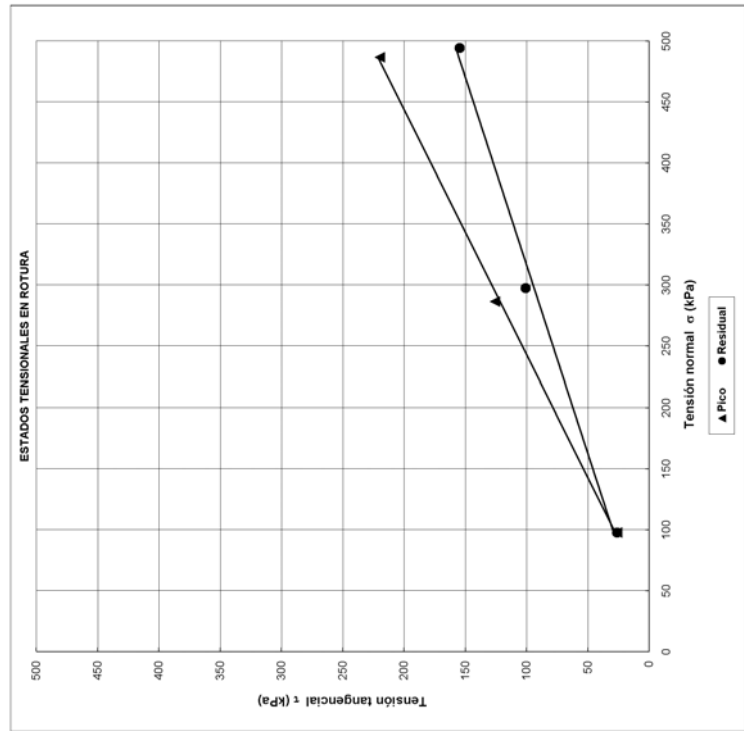
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:49

MUESTRA: Geocompuesto drenante/GCL

TIPO DE ENSAYO: SECO



ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS

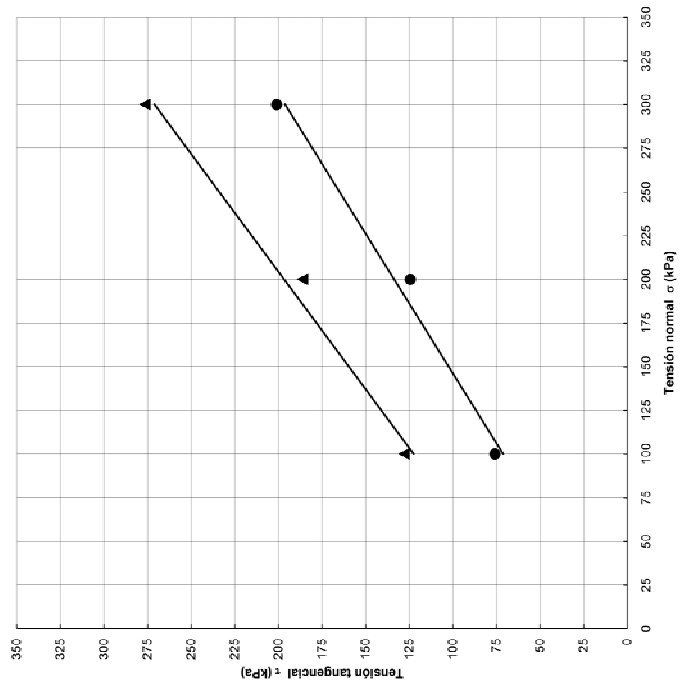
(UNE 103401:1998)

Ensayo Nº: 50

MUESTRA: SUELO1 COMPACTADA P. MODIFICADO TIPO DE ENSAYO C-D

Probeta Nº:	1	2	3
Tensión normal σ (kPa)	100	200	300
T. tang. de pico τ_p (kPa)	127.98	186.19	276.53
T. tang. residual τ_r (kPa)	75.94	124.50	201.00
Diámetro d (mm)	50.0	50.0	50.0
Lado L_1 (mm)			
Lado L_2 (mm)			
Alto h (mm)	25.0	25.0	25.0
Humedad inicial w_i (%)	15.16	16.02	15.48
Humedad final w_f (%)	19.05	19.57	18.59
Densidad seca γ_d (g/cm ³)	1.87	1.85	1.86
V. de ensayo (mm/min)	0.006	0.006	0.006

ESTADOS TENSIONALES EN ROTURA



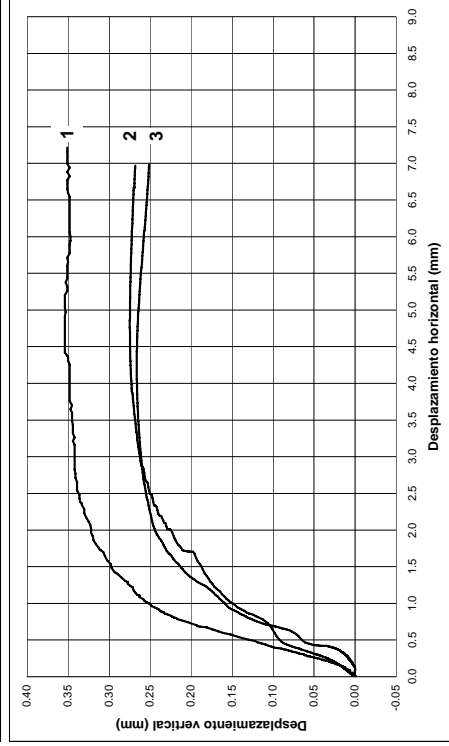
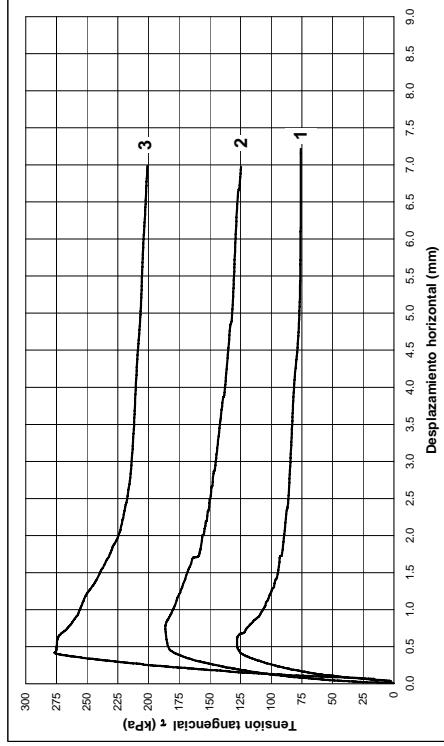
ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS

UNE 103401:1998

Ensayo Nº: 50

MUESTRA: SUELO1 COMPACTADA P. MODIFICADO TIPO DE ENSAYO C-D

Probeta Nº:	1	2	3
Tensión normal σ (kPa)	100	200	300



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo geosintético solo.

Ensayo n°: 51

Fecha: 04/10/2007-08//10/2007

Muestra: GCL

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCL1
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.5, 5, 15 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

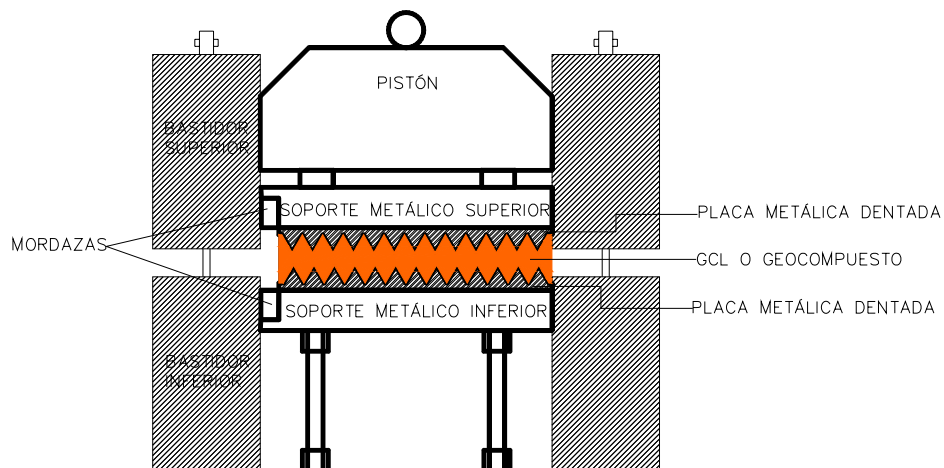
Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa y amordaza al soporte rígido superior.

Esquema:

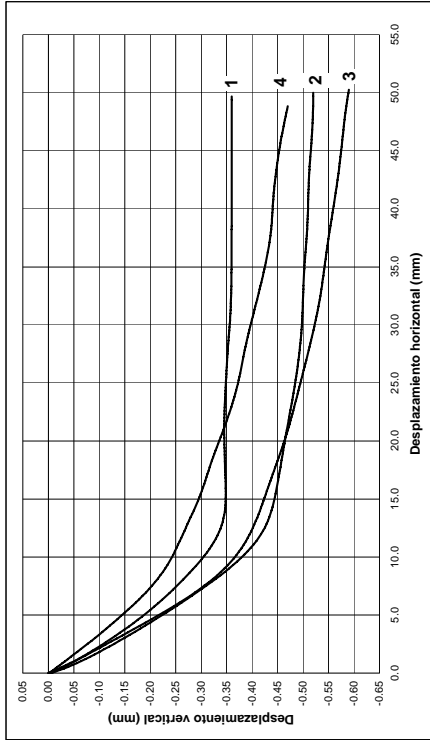
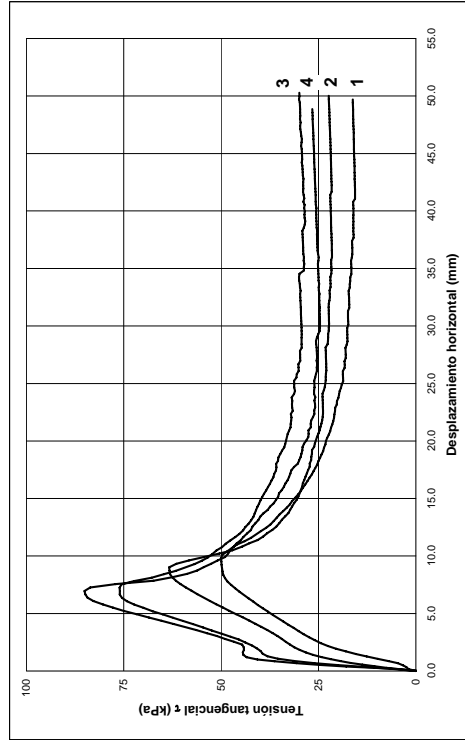


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 51

MUESTRA: GCL TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	500	500

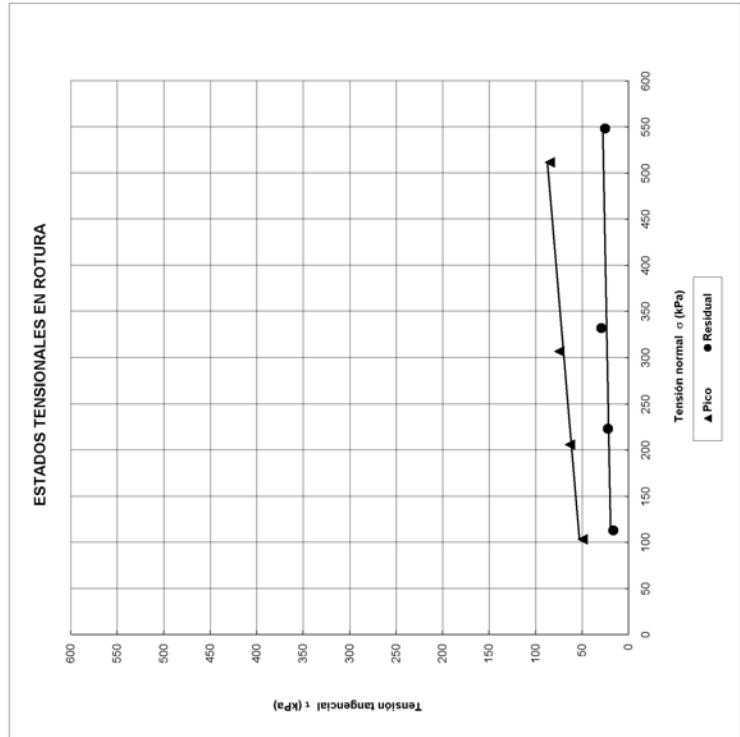


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 51

MUESTRA: GCL TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	500	500
T. tang. de pico τ_p (kPa)	49.53	63.06	74.73	84.76	84.76
T. tang. residual τ_r (kPa)	16.28	21.88	29.21	26.17	26.17
V. de ensayo (mm/min)	0.0550	0.0550	0.0550	0.0550	0.0550
Geosintético superior	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1
Lado, L ₁ (mm)	300.0	200.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor GCL hidratada, t _h (mm)	8-10	8-10	8-10	8-10	8-10
Humedad inicial (fase hidratación), w _i (%)	173.3	157.6	165.9	201.0	201.0
Humedad final, w _f (%)	156.1	123.8	124.5	122.1	122.1
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
Geosintético inferior					
Lado, L ₁ (mm)					
Lado, L ₂ (mm)					
Espesor, t (mm)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo geosintético solo.

Ensayo n°: 52

Fecha: 28/06/2007

Muestra: GCL

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCL1
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.5, 5, 15 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

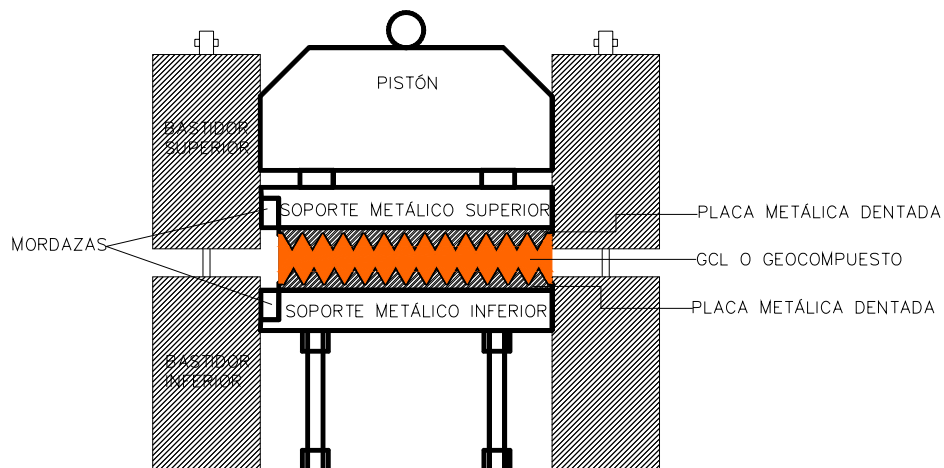
Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa y amordaza al soporte rígido superior.

Esquema:

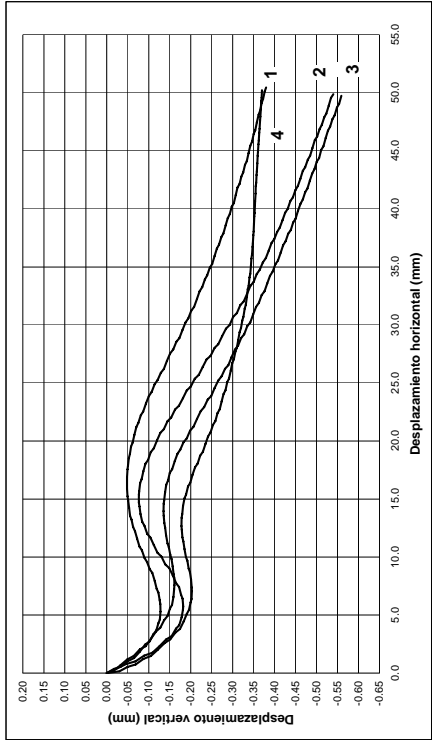
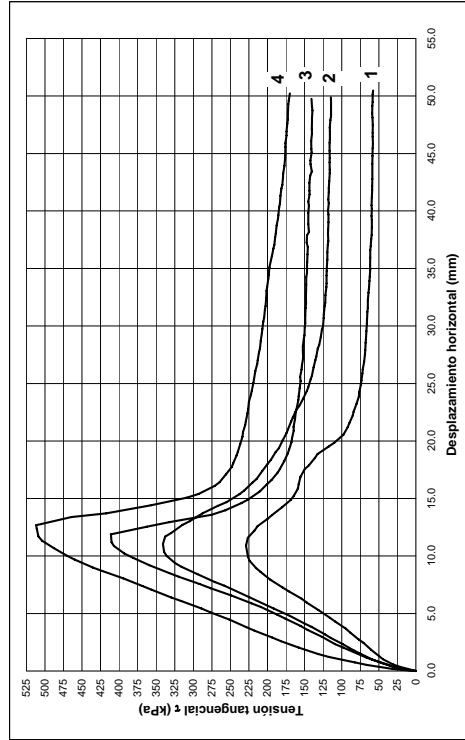


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 52

MUESTRA: GCL TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	150	200	300	500

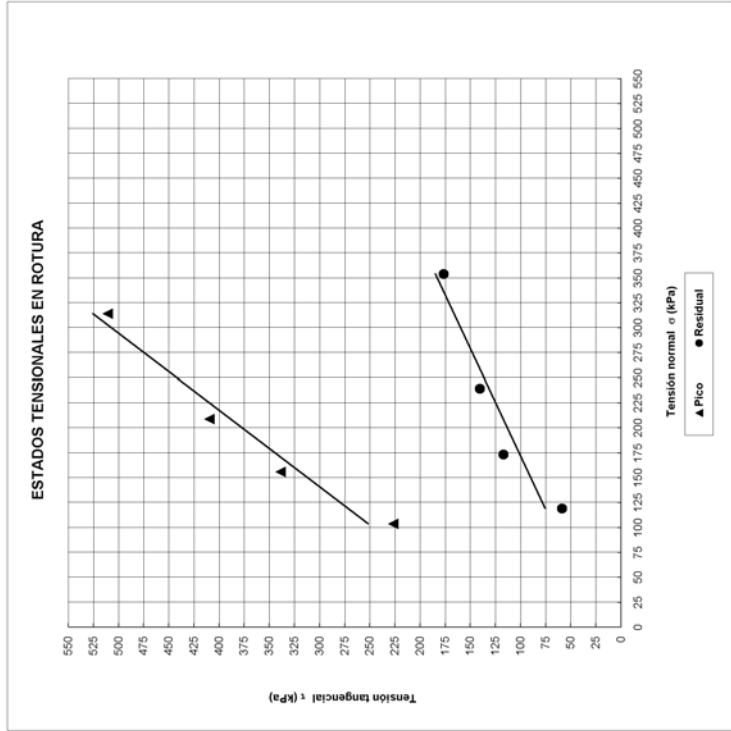


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 52

MUESTRA: GCL TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	150	200	300	500
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	226.82	338.62	409.41	510.55	239.43
T. tang. residual, τ_r (kPa)	58.60	116.84	140.60	176.53	65.89
V. de ensayo (mm/min)	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00
Geosintético superior	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1
Lado, L ₁ (mm)	300.0	150.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	6	6	6	6	6
Humedad inicial, w _i (%)	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Humedad final, w _f (%)	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
Geosintético inferior					
Lado, L ₁ (mm)					
Lado, L ₂ (mm)					
Espesor, t (mm)					



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 53

Fecha: 19/07/2007-25/07/2007

Muestra: GCL/GEOMEMBRANA

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCL1nw
Función: Impermeabilización

Geosintético: Geomembrana GM_{R3}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

GM: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 2.5, 5, 15 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

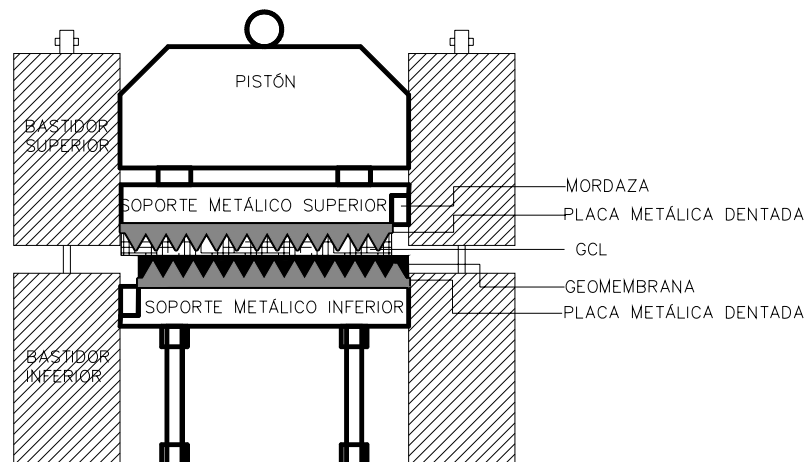
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa y atornillada

Esquema:

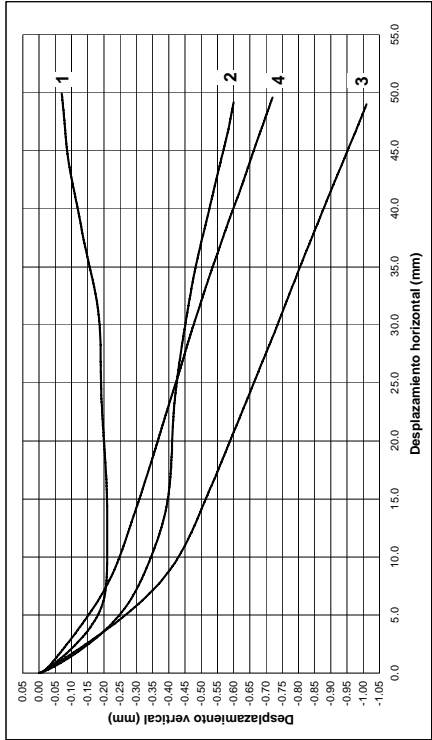
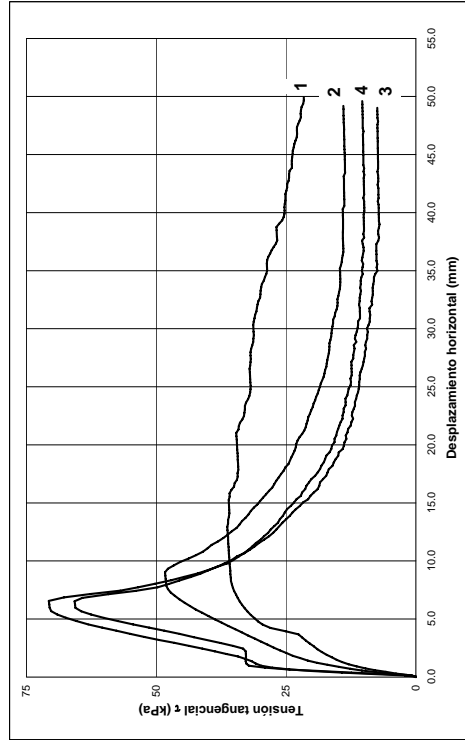


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
ASTM D5321-02

Ensayo N°: 53

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	300	500	500

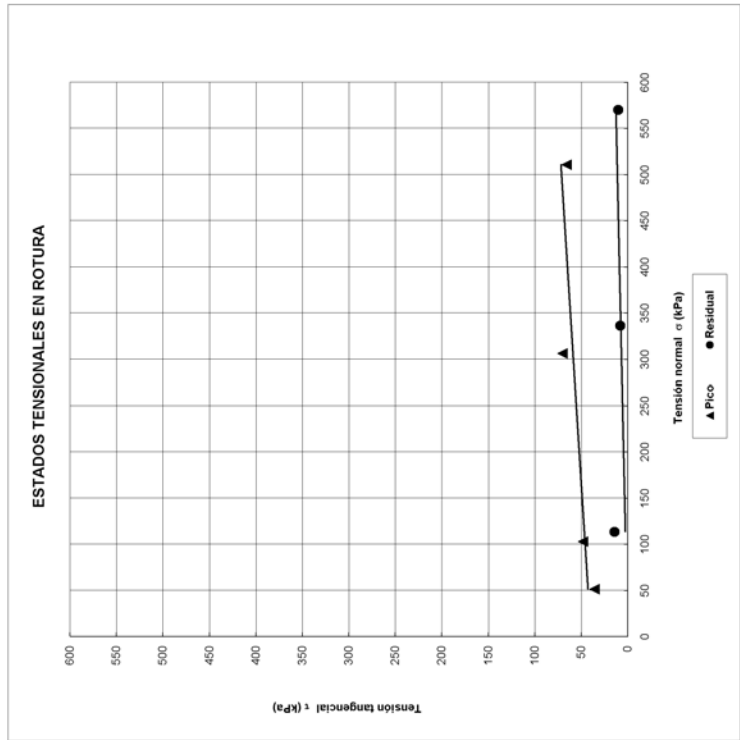


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 53

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	50	100	300	500	500
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	35.84	48.05	70.21	65.64	65.64
T. tang. residual, τ_r (kPa)	21.60	13.98	7.84	10.13	10.13
V. de ensayo (mm/min)	0.0550	0.0550	0.0550	0.0550	0.0550
Geosintético superior					
GCL1	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1	GCL1
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor GCL hidratada, t _s (mm)	8-10	8-10	8-10	8-10	8-10
Humedad inicial (fase hidratación), w _i (%)	158.8	169.0	187.5	182.0	182.0
Humedad final, w _f (%)	144.8	142.5	116.4	106.1	106.1
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
Geosintético inferior					
GM	GM	GM	GM	GM	GM
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

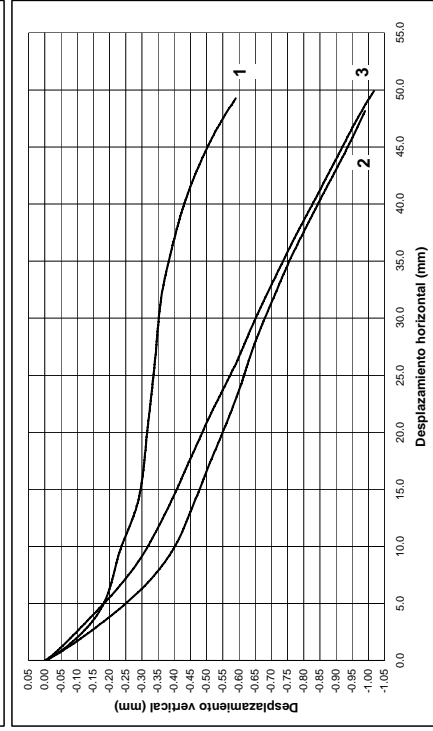
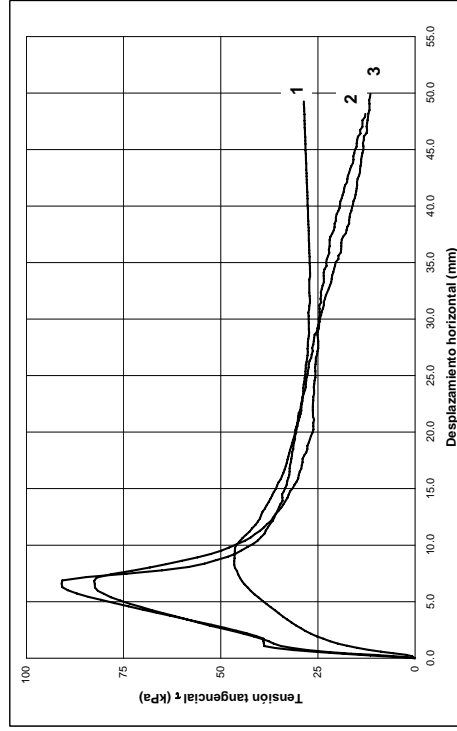


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 53-GCL amordazada

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		

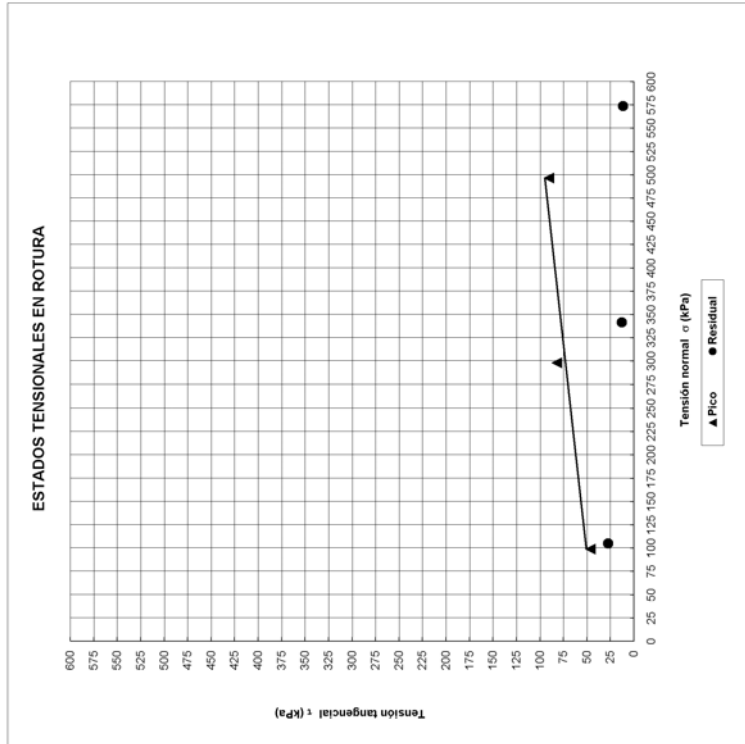


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°: 53-GCL amordazada

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta N°	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		
T tang de pico τ_p (kPa)	48.14	82.16	90.45		
T tang residual τ_r (kPa)	27.24	12.81	11.81		
V de ensayo (mm/min)	0.0550	0.0550	0.0550		
Geosintético superior	GCL1	GCL1	GCL1		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor GCL hidratada t_c (mm)	8.10	8.10	8.10		
Humedad inicial (fase hidratación) w _i (%)	169.4	179.7	182.0		
Humedad final w _f (%)	137.0	117.0	106.1		
Masa por unidad de área m _a (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		
Geosintético inferior	GMI	GMI	GMI		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 54

Fecha: 19/11/2007-20/11/2007

Muestra: Geocompuesto drenante/GCL

Geosintético: Geocompuesto drenante GC2
Función: Drenaje, filtración, anticontaminante de finos y protección.

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCL1nw
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada: geotextil 300 gr/m²
GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido.

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillo dinamométrico de 5 y 50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

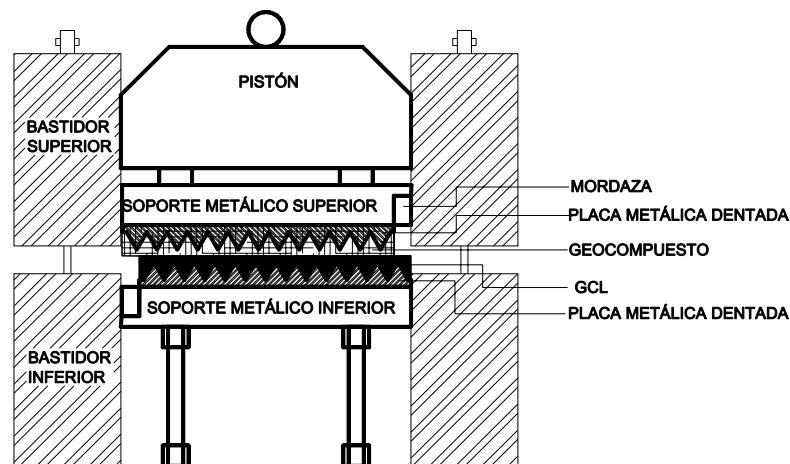
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y amordazo al soporte rígido superior

GCL colocada sobre superficie rugosa inferior.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm (ASTM D5321-02)

Ensayo N°:54

MUESTRA : Geocompuesto drenante/GCL

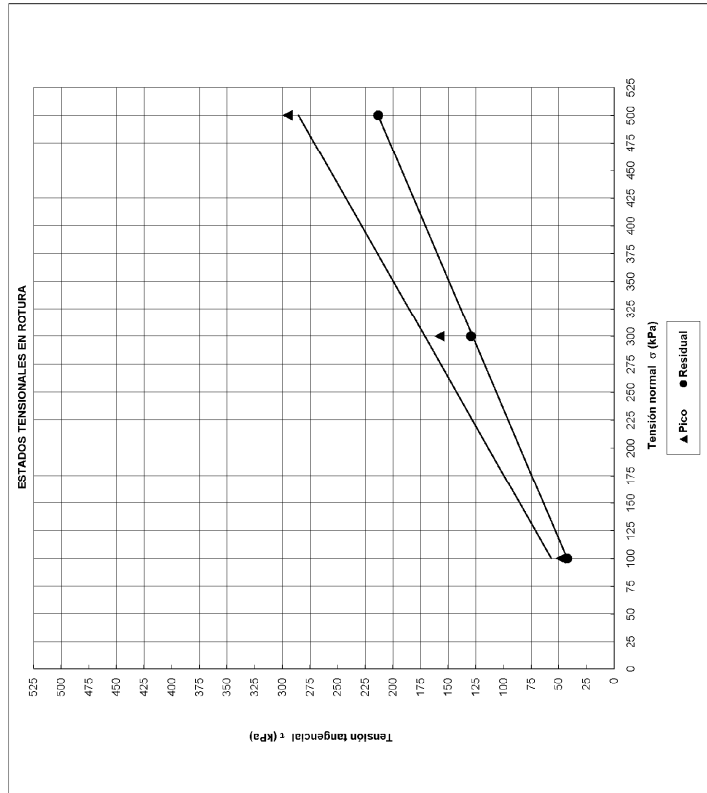
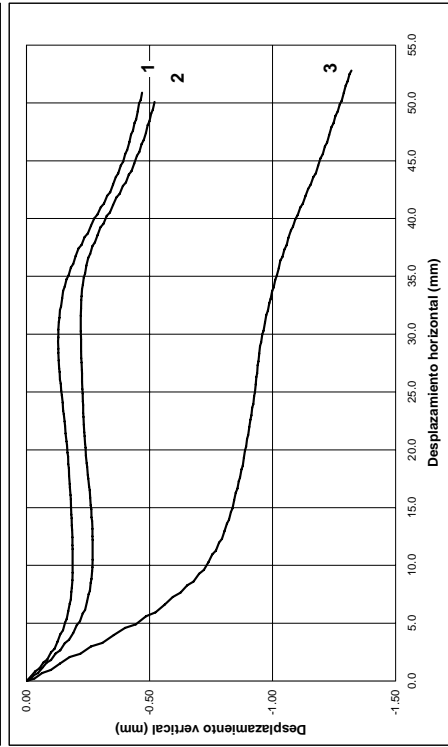
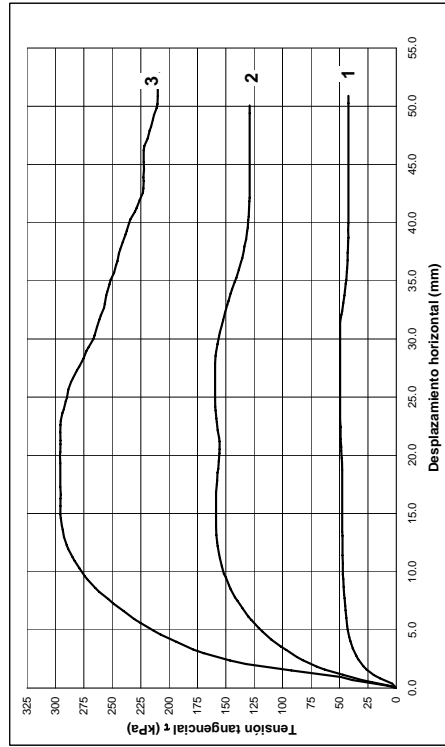
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico, τ_p (kPa)	48.40	157.97	295.26		
T. tang. residual, τ_r (kPa)	42.37	128.28	213.10		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético superior	GC	GC	GC		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor a 20 y 200 kPa, t (mm)	6.8-5.9	6.8-5.9	6.8-5.9		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	960.0	960.0	960.0		
Geosintético inferior	GCL	GCL	GCL		
Lado, L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado, L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor a 20 y 200 kPa, t (mm)	6.8	6.8	6.8		
Humedad inicial, w _i (%)	11.5	11.5	11.5		
Humedad final, w _f (%)	11.5	11.5	11.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		

MUESTRA: Geocompuesto drenante/GCL

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N° :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 55

Fecha: 21/11/2007

Muestra: GCL/GEOMEMBRANA

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCL1nw
Función: Impermeabilización

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido

GM: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillos dinamométricos 13.5 kN y 50 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

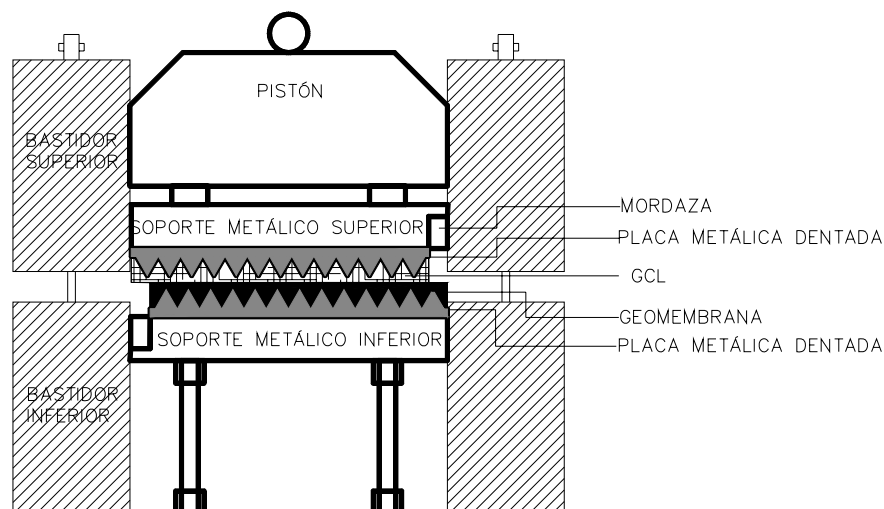
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

GCL colocada sobre superficie rugosa y amordaza al soporte rígido superior.

Geomembrana colocada sobre superficie rugosa y atornillada

Esquema:

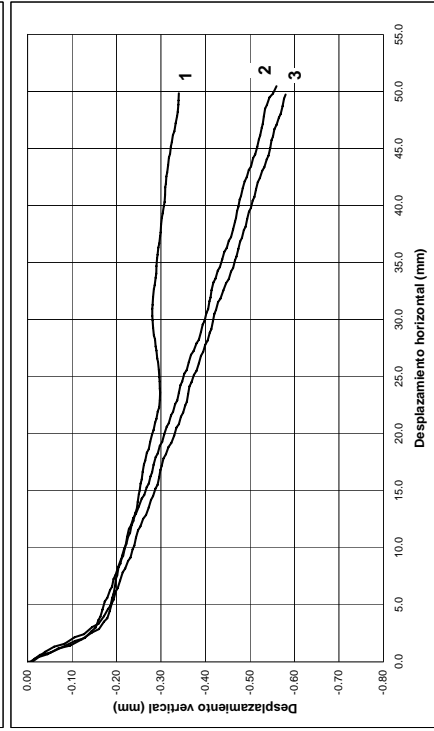
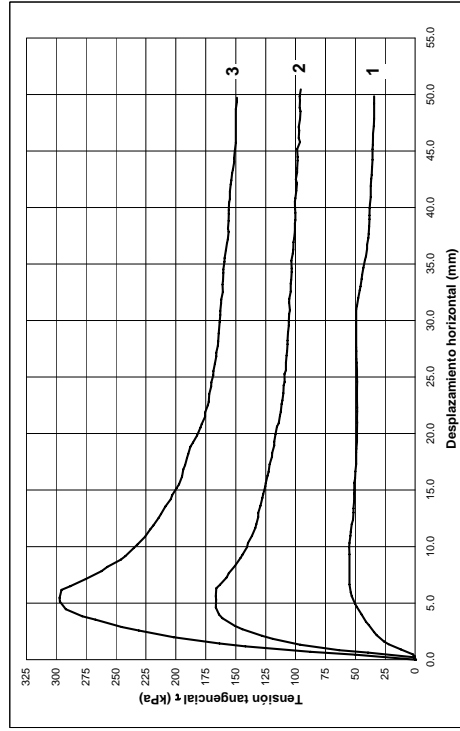


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 55

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		

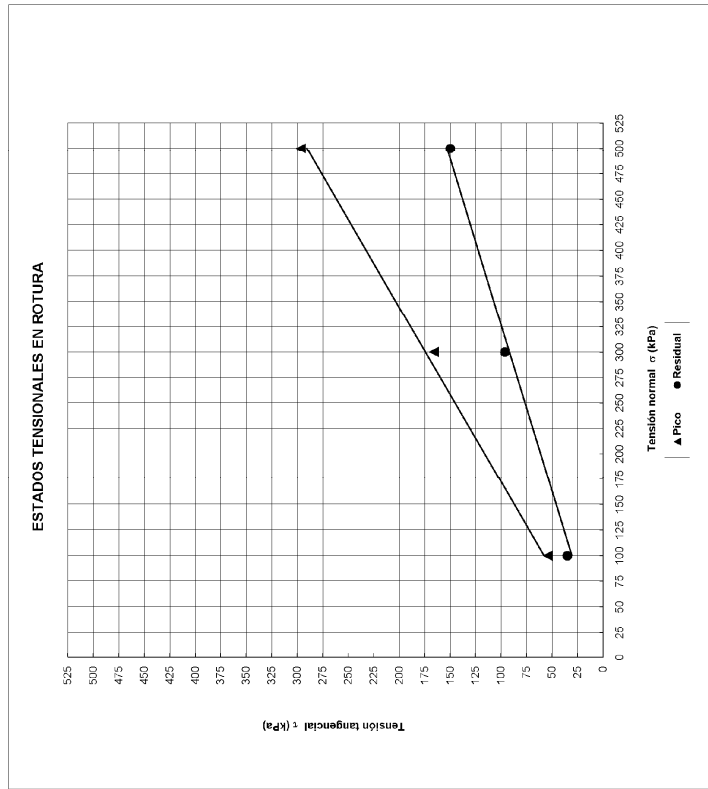


ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm
(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº: 55

MUESTRA: GCL/Geomembrana TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		
T. máx. de pico σ_1 (kPa)	84.49	186.96	286.39		
T. máx. residual σ_2 (kPa)	35.13	66.46	149.00		
V. máx. de pico σ_1 (kPa)	50.00	66.00	50.00		
Geométrico superior	GCL	GCL	GCL		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	6.0	6.0	6.0		
Humedad inicial, w(%)	11.5	11.5	11.5		
Humedad final, w(%)	11.5	11.5	11.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		
Geométrico inferior	GM	GM	GM		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor t (mm)	1.5	1.5	1.5		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 56

Fecha: 27/11/2007-29/11/2007

Muestra: SUELO/GEOMEMBRANA

Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Proctor modificado
 Densidad máxima: 1.92 (t/m³)
 Humedad óptima: 12 (%)

Geosintético: Geomembrana GM_{R1}
 Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geomembrana: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillos dinamométricos de 5 kN, y 13.5 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

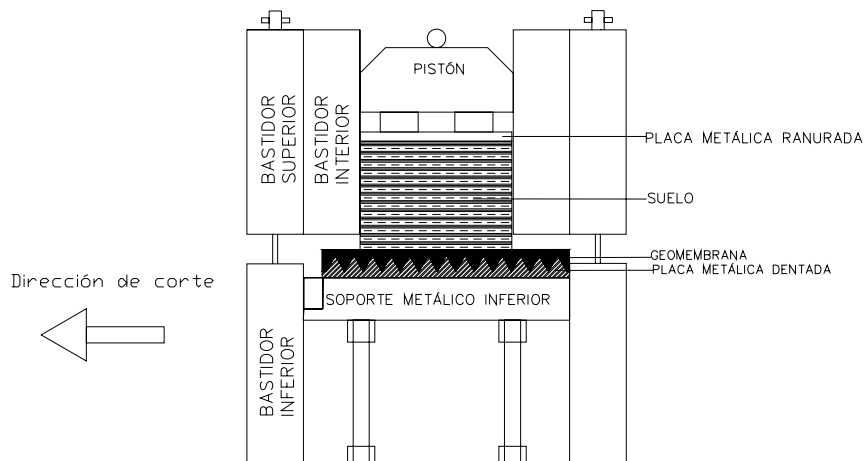
Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geomembrana atornillada sobre superficie rugosa.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:56

MUESTRA: Suelo/Geomembrana

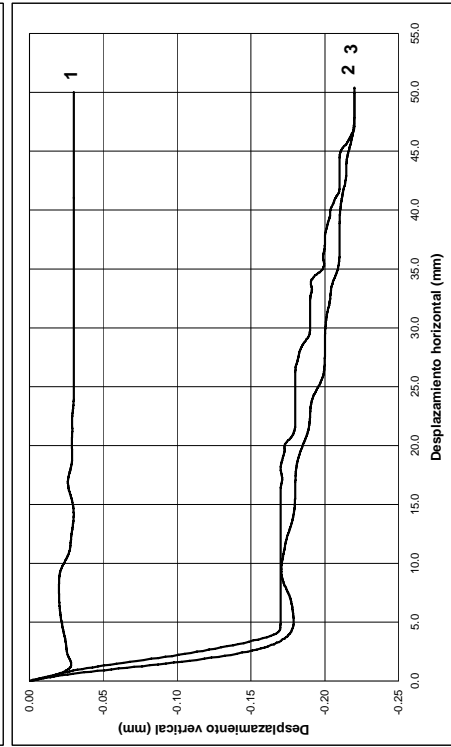
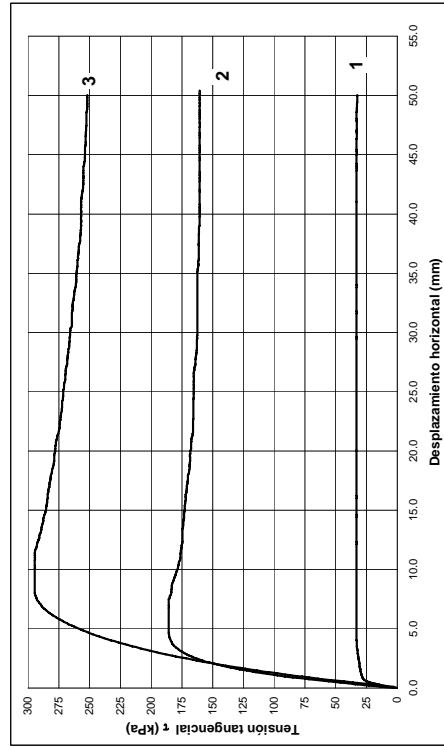
TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	32.98	185.06	293.93		
T. tang. residual τ_r (kPa)	32.98	181.38	292.71		
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1		
Lado L_1 (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L_2 (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto, h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w(%)	12.00	12.00	12.00		
Humedad final, wf(%)	12.00	12.00	12.00		
Densidad seca, γ_d (t/m ³)	1.96	1.96	1.96		
Geosintético inferior	GM	GM	GM		
Lado L_1 (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L_2 (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	1.5	1.5	1.5		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	1.000	1.000	1.000		
V. de ensayo (mm/min)					

MUESTRA: Suelo/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Probeta Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	100	300	500		



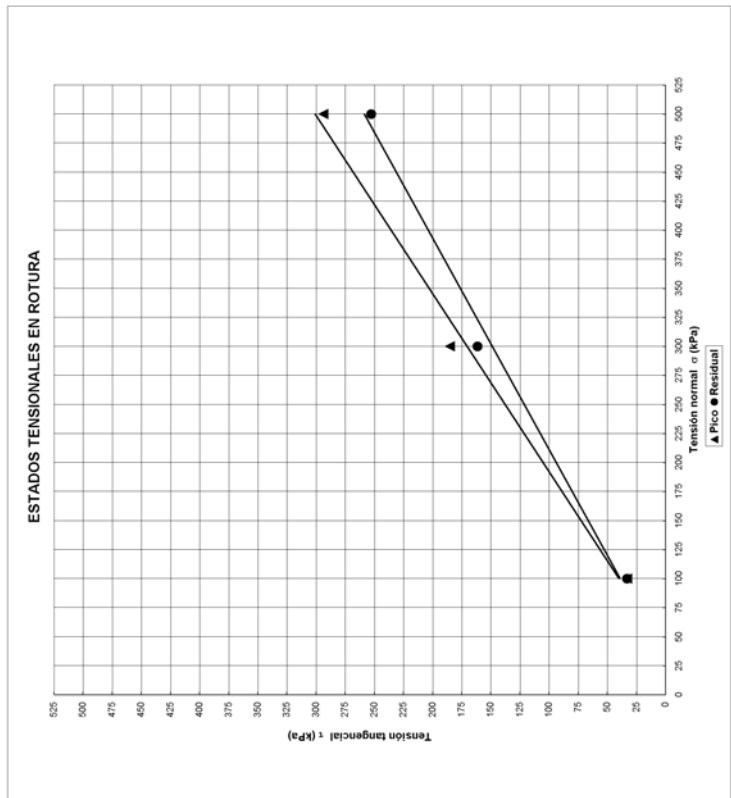
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:56

MUESTRA: Suelo/Geomembrana

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 57

Fecha: 08/01/2008

Muestra: SUELO/GEOTEXTIL

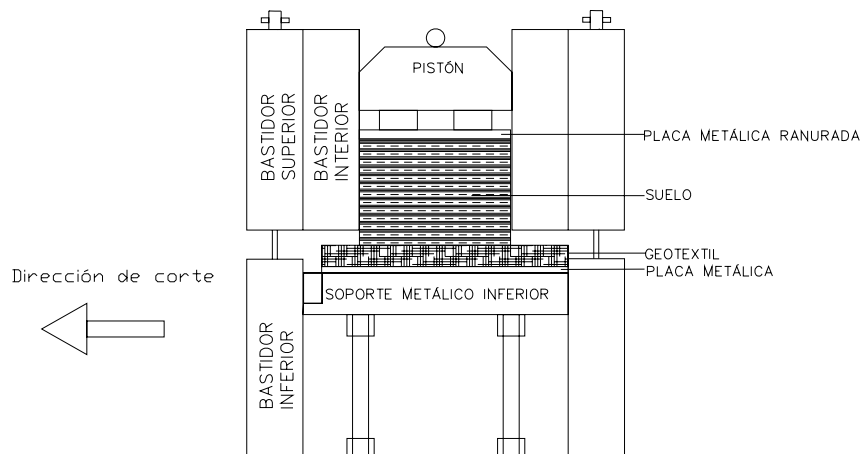
Suelo: Suelo2
 Arcilla arenosa: 85% suelo fino y 15% suelo grueso
 Límite líquido: 37.15 (%)
 Índice de plasticidad: 16.89 (%)
 Compactación: Proctor normal
 Densidad máxima: 1.86 (t/m³)
 Humedad óptima: 13.21 (%)

Geosintético: Geotextil GT4
 Función: Protección de geomembranas.

Dirección de ensayo del material:
 Geotextil: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:
 Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillo dinamométrico de 5 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:
 Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)
 Métodos de sujeción de los geosintéticos:
 Geotextil pegado a soporte inferior y sujeto con mordaza.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:57

MUESTRA: Suelo/Geotextil

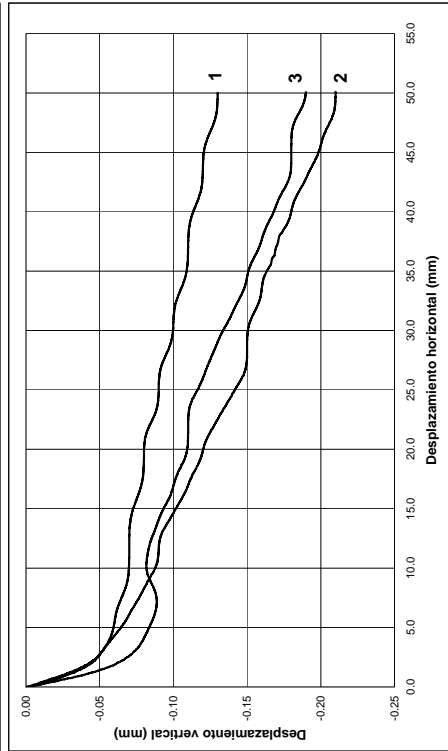
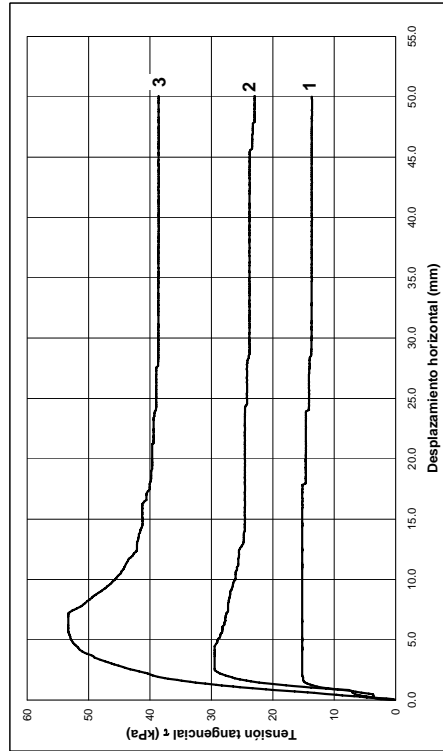
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		

SECO

TIPO DE ENSAYO:

Suelo/Geotextil



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

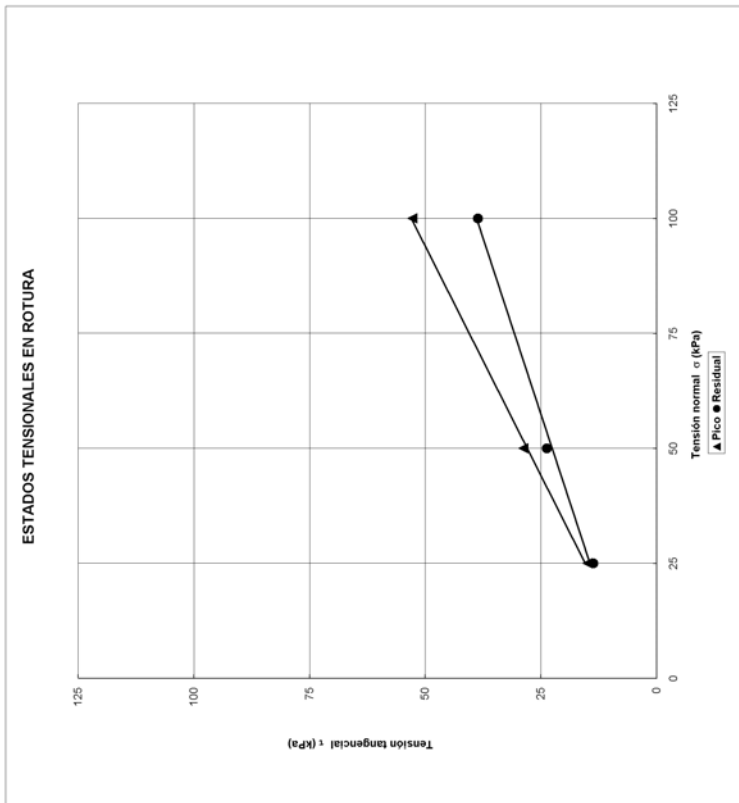
(ASTM D5321-02)

Ensayo N°:57

MUESTRA: Suelo/Geotextil

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta N°:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T. lang. de pico τ_p (kPa)	15,02	28,80	52,80		
T. lang. residual τ_r (kPa)	13,69	23,74	38,61		
Suelo	Suelo2	Suelo2	Suelo2		
Lado L_1 (mm)	200,0	200,0	200,0		
Lado L_2 (mm)	200,0	200,0	200,0		
Alto h (mm)	50,0	50,0	50,0		
Humedad inicial w_i (%)	17,49	17,49	17,49		
Humedad final w_f (%)	17,49	17,49	17,49		
Densidad seca γ_d (kN/m ³)	1,78	1,78	1,78		
Geosintético inferior	GT	GT	GT		
Lado L_1 (mm)	300,0	300,0	300,0		
Lado L_2 (mm)	280,0	280,0	280,0		
Espesor t (mm)	1,0	1,0	1,0		
Masa por unidad de área m (g/m ²)	160,0	160,0	160,0		
V. de ensayo (mm/min)	1,000	1,000	1,000		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 58

Fecha: 23/01/2008

Muestra: Suelo/Geomalla/Geocompuesto drenante

Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Proctor normal
 Densidad máxima: 1.74 (t/m³)
 Humedad óptima: 17.50 (%)

Geosintético superior: Geomalla GMalla1
 Función: Refuerzo.

Geosintético inferior: Geocompuesto drenante GC1
 Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (georred).

Dirección de ensayo del material:

Geomalla: Dirección de fabricación (MD)
 Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD)

Aparatos de ensayo:

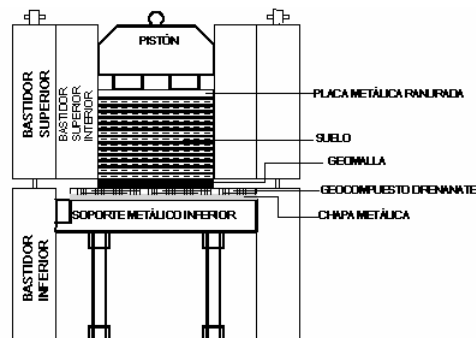
Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
 Anillos dinamométricos de 5 kN y 13.5 kN, marca Wykeham Farrance
 Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)
 Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)
 Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geomalla imbricada en el suelo.
 Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Esquema:



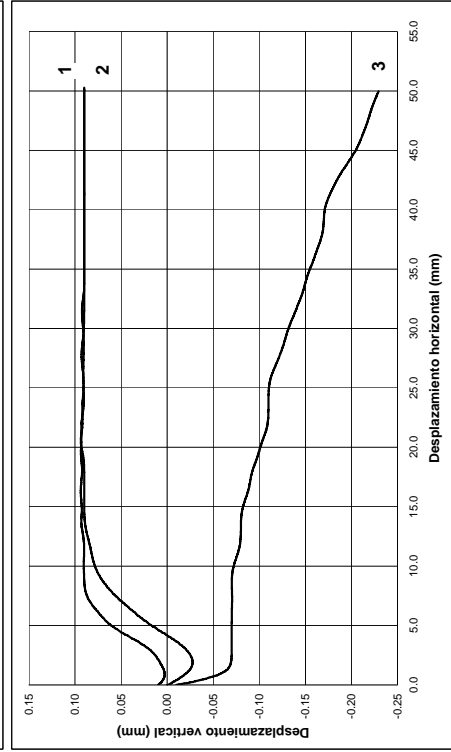
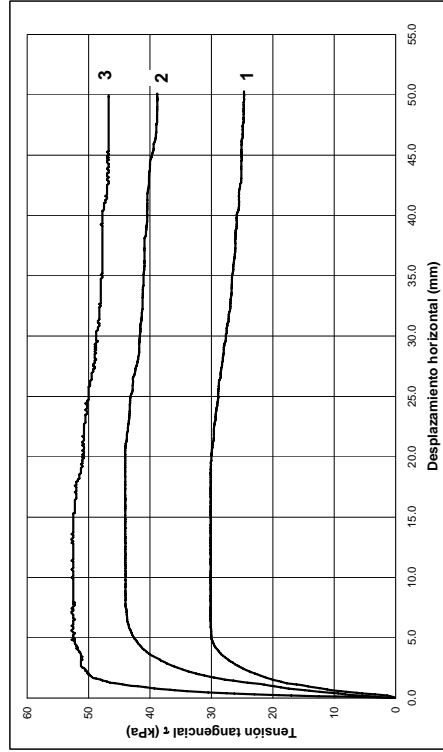
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo Nº:58

MUESTRA: Suelo/Geomalla/Geodren TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		



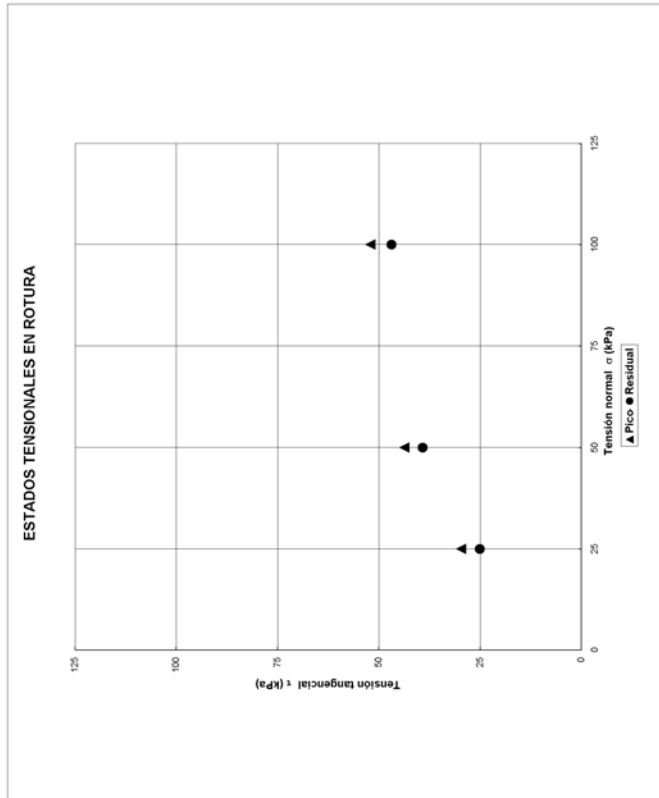
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:58

MUESTRA: Suelo/Geomalla/Geodren TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal σ (kPa)	25	50	100		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	29.66	43.76	52.13		
T. tang. residual τ_r (kPa)	25.05	39.18	46.84		
V. de ensayo (mm/min)	1.000	1.000	1.000		
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1		
Lado L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Alto, h (mm)	50.0	50.0	50.0		
Humedad inicial, w(%)	17.49	17.49	17.49		
Humedad final, w(%)	17.49	17.49	17.49		
Densidad seca, γ_d (t/m ³)	1.78	1.78	1.78		
Geosintético superior	GMalla	GMalla	GMalla		
Lado L ₁ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Lado L ₂ (mm)	200.0	200.0	200.0		
Espesor, t (mm)	580.0	580.0	580.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	GC	GC	GC		
Geosintético inferior	GC	GC	GC		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	280.0	280.0	280.0		
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0		



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre geosintético y geosintético.

Ensayo n°: 59

Fecha: 16/12/2007-20/12/2007

Muestra: Geocompuesto drenante/GCL

Geosintético: Geocompuesto drenante GC2
Función: Drenaje, filtración, anticontaminante de finos y protección.

Geosintético: GCL (Geosynthetic Clay Liner) GCL1nw
Función: Impermeabilización

Dirección de ensayo del material:

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil 300 gr/m²
GCL: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada geotextil no tejido.

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance
Anillos dinamométricos de 5, 13.5 y 50 kN, marca Wykeham Farrance
Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

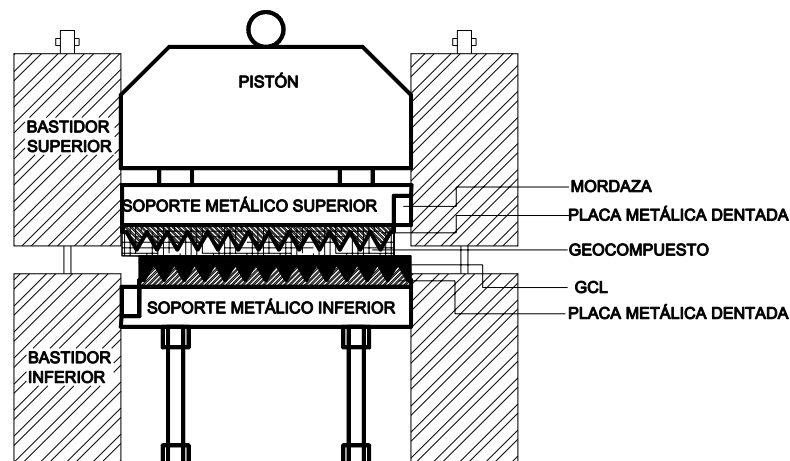
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y amordazo al soporte rígido superior

GCL colocada sobre superficie rugosa inferior.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

ASTM D5321-02

Ensayo Nº:59

MUESTRA : Geocompuesto drenante/GCL

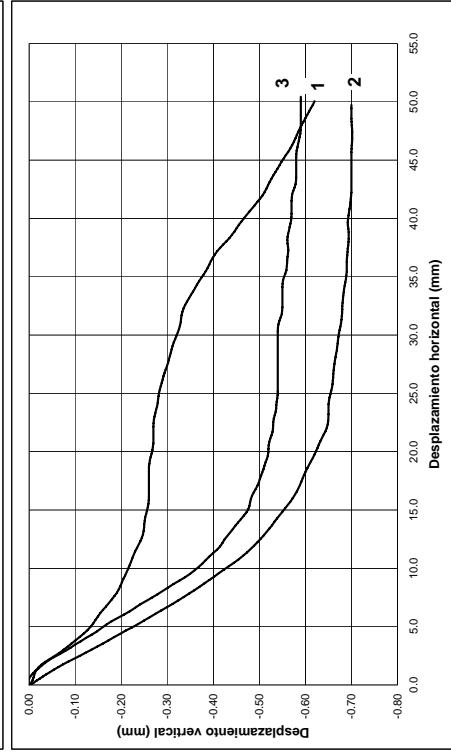
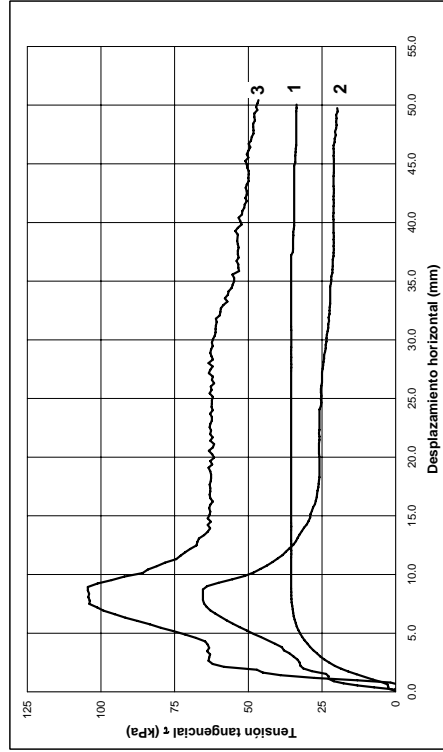
TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Prueba Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		
T. tang. de pico τ_p (kPa)	35.14	64.97	104.16		
T. tang. residual τ_r (kPa)	33.94	20.81	47.69		
V. de ensayo (mm/min)	5.000	5.000	5.000		
Geosintético superior	GCL	GCL	GCL		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor a 20 y 200 kPa, t (mm)	6.8-5.9	6.8-5.9	6.8-5.9		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	960.0	960.0	960.0		
Geosintético inferior	GCL	GCL	GCL		
Lado L ₁ (mm)	300.0	300.0	300.0		
Lado L ₂ (mm)	282.0	282.0	282.0		
Espesor, hidrabada (mm)	10.0	10.0	10.0		
Humedad inicial (fase hidratación), w _i (%)	150.5	183.0	197.9		
Humedad final, w _f (%)	142.0	143.8	124.4		
Masa por unidad de área, m (g/m ²)	5000.0	5000.0	5000.0		

MUESTRA: Geocompuesto drenante/GCL

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO

Prueba Nº :	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	100	300	500		



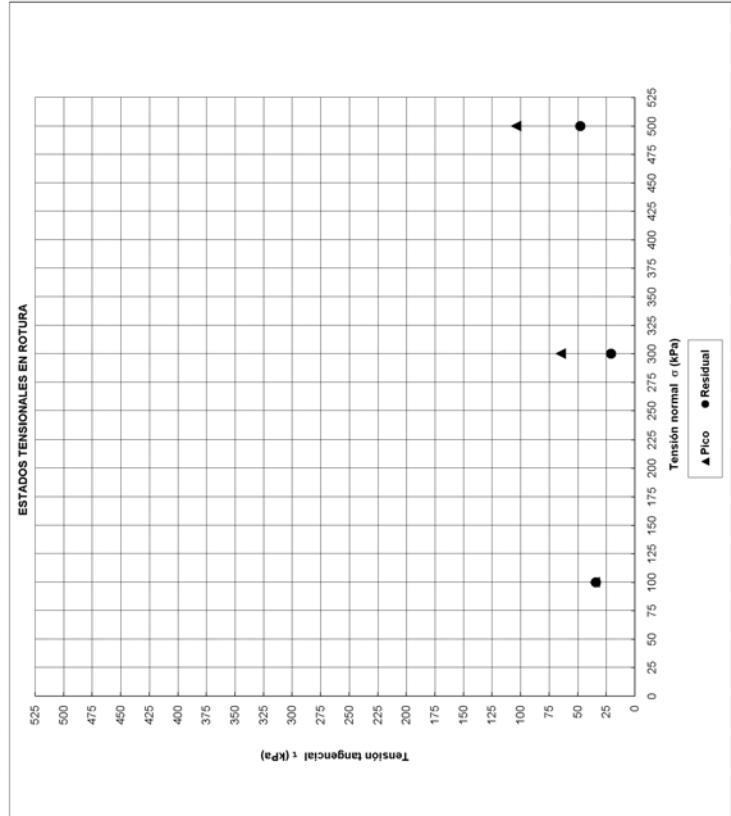
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:59

MUESTRA : Geocompuesto drenante/GCL

TIPO DE ENSAYO: HÚMEDO



Proyecto: Estudio de las características friccionales de los geosintéticos usados en vertederos

Nombre del ensayo: Ensayo de Corte Directo entre suelo y geosintético.

Ensayo n°: 75

Fecha: 03/06/2008-07/06/2008

Muestra: Suelo/Geomalla/Geocompuesto drenante

Suelo: Suelo1
 Arcilla arenosa: 95% suelo fino y 5% suelo grueso
 Límite líquido: 45.43 (%)
 Índice de plasticidad: 21.28 (%)
 Compactación: Proctor normal
 Densidad máxima: 1.74 (t/m³)
 Humedad óptima: 17.50 (%)

Geosintético superior: Geomalla GMalla2

Función: Refuerzo.

Geosintético inferior: Geocompuesto drenante GC1

Función: Filtro (geotextiles), Drenaje y Protección (georred).

Dirección de ensayo del material:

Geomalla: Dirección de fabricación (MD)

Geocompuesto drenante: Dirección de fabricación (MD). Cara ensayada 200gr/m²

Aparatos de ensayo:

Máquina de corte directo 300x300 mm, marca Wykeham Farrance

Anillo dinamométrico de 5 kN, marca Wykeham Farrance

Aparatos de medida:

Fuerza tangencial: LVDT LSC (10 mm)

Desplazamiento horizontal: LVDT ACT1000A/1012 (50 mm)

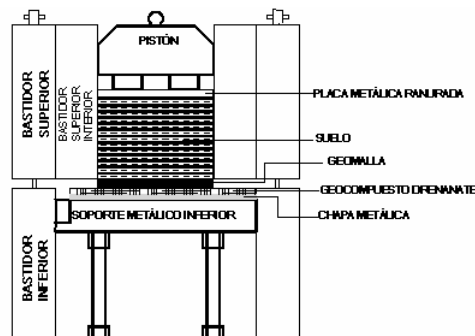
Desplazamiento vertical: LVDT LSC (25 mm)

Métodos de sujeción de los geosintéticos:

Geomalla anclada al suelo.

Geocompuesto drenante colocado sobre superficie rugosa y sujeto con mordaza.

Esquema:



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:75

MUESTRA: Suelo/Geomalla/Geodren

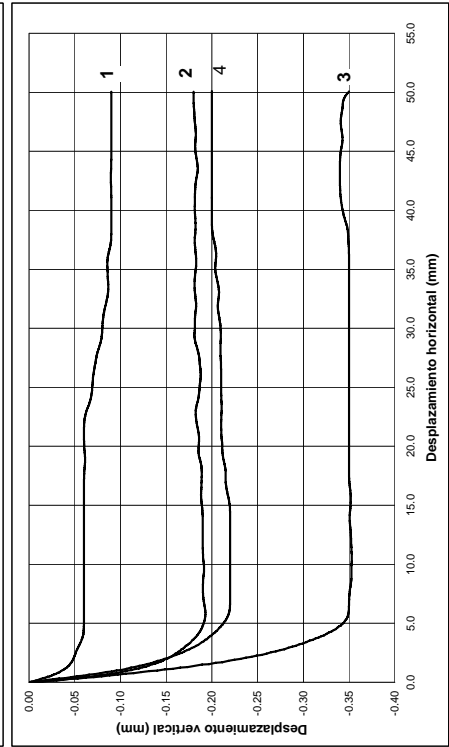
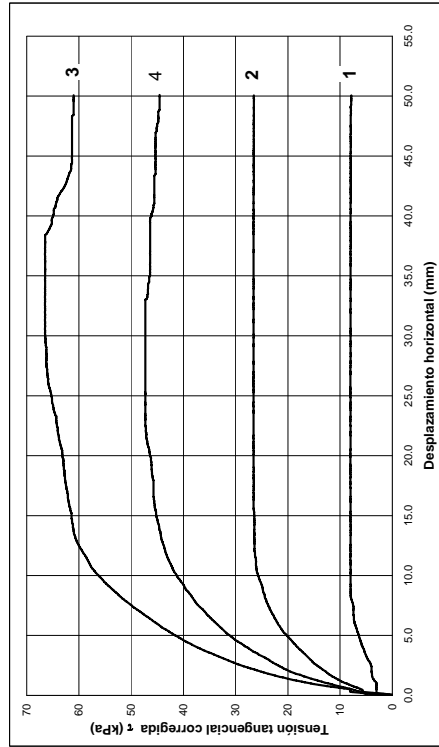
TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	75	50
T. tang. de pico τ_p (kPa)	7.92	26.47	66.04	47.30	44.98
T. tang. residual τ_r (kPa)	7.92	26.47	61.44	44.98	44.98
V. de ensayo (mm/min)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Suelo	Suelo1	Suelo1	Suelo1	Suelo1	Suelo1
Lado, L_x (mm)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
Lado, L_y (mm)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
Alto, h (mm)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Humedad inicial, w(%)					
Humedad final, w_f(%)					
Densidad seca, γ_d (g/cm ³)					
Geosintético superior	GMalla	GMalla	GMalla	GMalla	GMalla
Lado, L_x (mm)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
Lado, L_y (mm)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
Espesor, t (mm)					
Geosintético inferior	GC	GC	GC	GC	GC
Massa por unidad de área, m (g/m ²)	490.0	490.0	490.0	490.0	490.0
Lado, L_x (mm)	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Lado, L_y (mm)	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0
Espesor, t (mm)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Massa por unidad de área, m (g/m ²)	950.0	950.0	950.0	950.0	950.0

MUESTRA: Suelo/Geomalla/Geodren

TIPO DE ENSAYO: SECO

Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Tensión normal, σ (kPa)	25	50	100	75	50



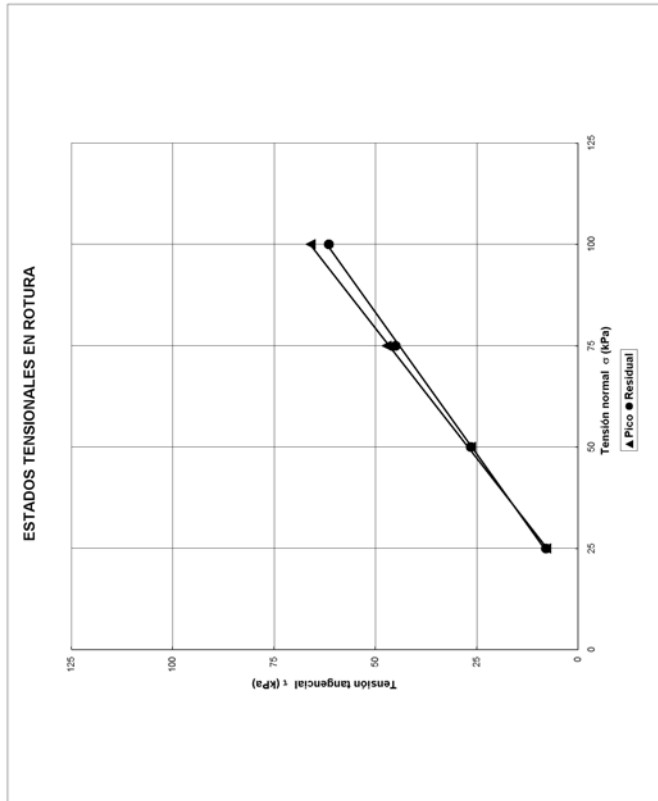
ENSAYO DE CORTE DIRECTO 300x300 mm

(ASTM D5321-02)

Ensayo Nº:75

MUESTRA: Suelo/Geomalla/Geodren

TIPO DE ENSAYO: SECO



ENSAYO DE CORTE DIRECTO 60x60 mm DE LA BENTONITA

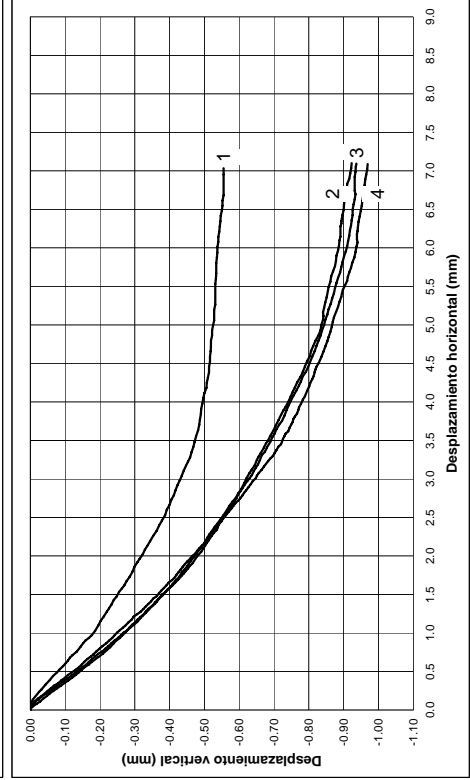
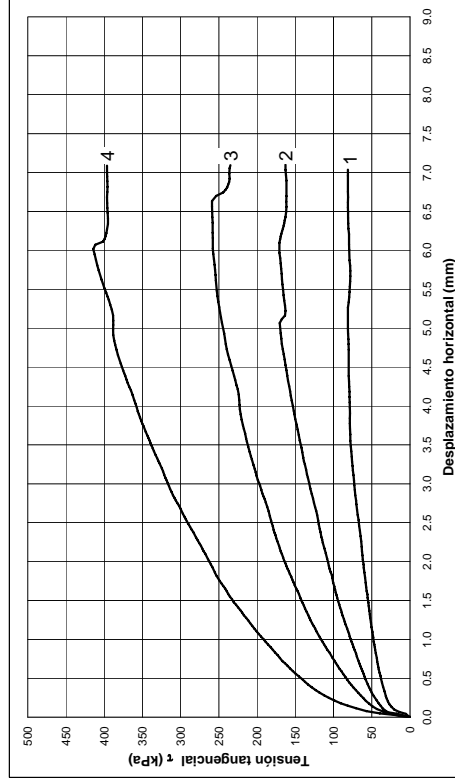
ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS

(UNE 103401:1998)

Muestra Nº: Bentonita1

MUESTRA: INALTERADA TIPO DE ENSAYO: C-D

Probeta Nº:	1	2	3	4
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	500



ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS

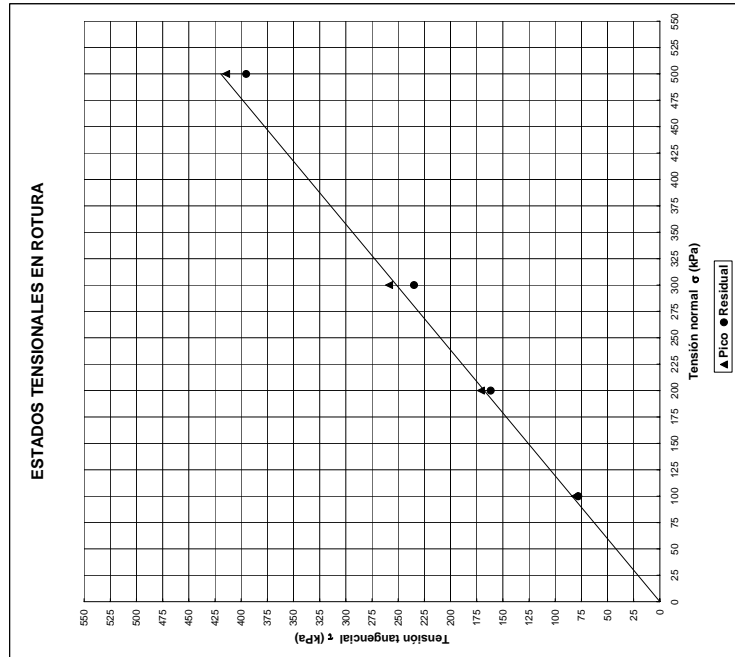
(UNE 103401:1998)

Muestra Nº: Bentonita1

MUESTRA: INALTERADA TIPO DE ENSAYO: C-D

Probeta Nº:	1	2	3	4
Tensión normal, σ (kPa)	100	200	300	500
T. tang. de pico τ_p (kPa)	81.30	170.90	258.80	414.40
T. tang. residual τ_r (kPa)	78.00	161.60	234.90	395.20
Diámetro, d (mm)	50,0	50,0	50,0	50,0
Lado, L_1 (mm)				
Lado, L_2 (mm)				
Alto, h (mm)	27,3	27,3	27,3	27,3
Humedad inicial, w (%)	11,49	11,49	11,49	11,49
Humedad final, w_f (%)	11,49	11,49	11,49	11,49
Densidad seca, γ_d (g/cm ³)	0,84	0,84	0,84	0,84
V.de ensayo, (mm/min)	0,70	0,70	0,70	0,70

Observaciones:

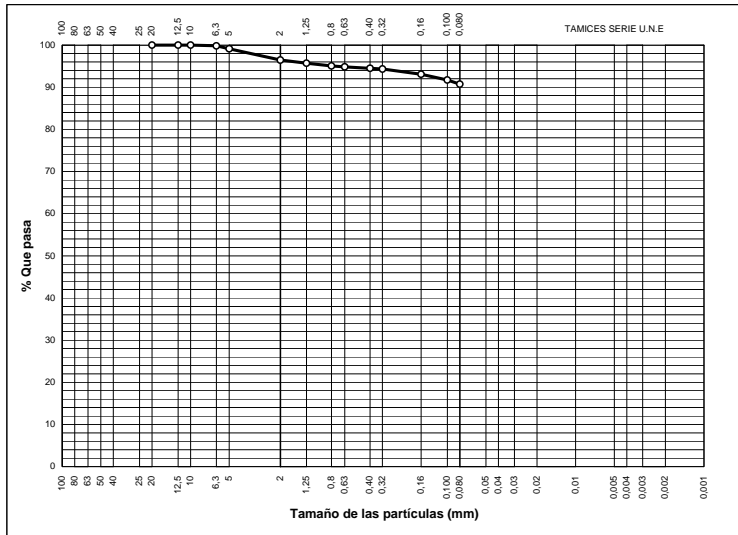


ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

UNE 103 101 :1995

Muestra Nº: Suelo 1

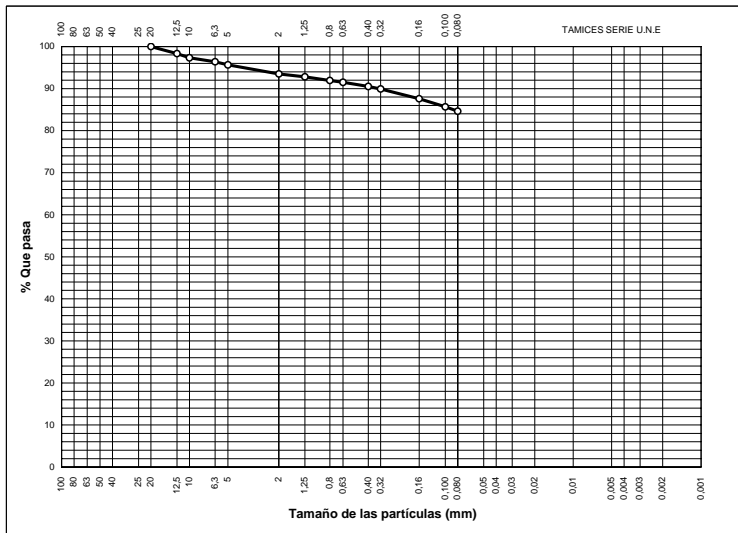


Tamices	(%) que pasa
100	
80	
63	
50	
40	
25	
20	100.00
12.5	100.00
10	100.00
6.3	99.81
5	99.13
2	96.46
1.25	95.70
0.8	95.05
0.63	94.85
0.40	94.50
0.32	94.30
0.16	93.07
0.100	91.72
0.08	90.75

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

UNE 103 101 :1995

Muestra Nº: Suelo 2



Tamices	(%) que pasa
100	
80	
63	
50	
40	
25	
20	100.00
12.5	98.34
10	97.32
6.3	96.38
5	95.64
2	93.49
1.25	92.79
0.8	91.93
0.63	91.49
0.40	90.51
0.32	89.91
0.16	87.59
0.100	85.67
0.08	84.60

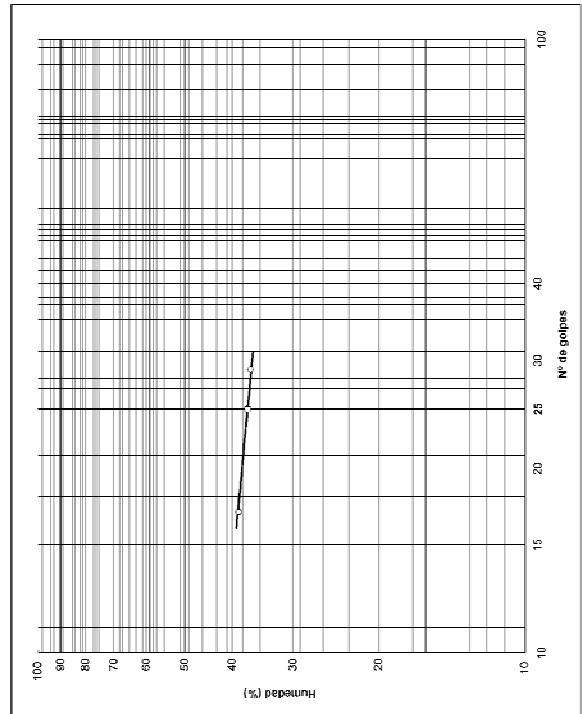
LÍMITES DE ATTERBERG
(UNE 103-103-94) (UNE 103-104-93)

Muestra N°: Suelo2

LÍMITE LÍQUIDO		Nº de golpes	17	28
-		Ref. tara	13	27
a=(t+s)/(t-s)		Agua	2,15	2,11
hasta		Tara+suelo+agua	16,57	16,75
t+s		Tara+suelo	14,64	14,64
s=(t-s)/t		Tara	5,97	5,97
h=a/s*100		% Humedad	33,74	36,63

LÍMITE PLÁSTICO		Ref. tara	21	22
-		Agua	1,09	7,41
a=(t+s)/(t-s)		Tara+suelo+agua	3,42	30,61
hasta		Tara+suelo	31,96	32,33
t+s		Tara	5,18	7,17
s=(t-s)/t		Suelo	20,85	19,67
h=a/s*100		% Humedad		

Límite líquido: **37,15**
Límite plástico: **20,26**
I. de plasticidad: **16,89**



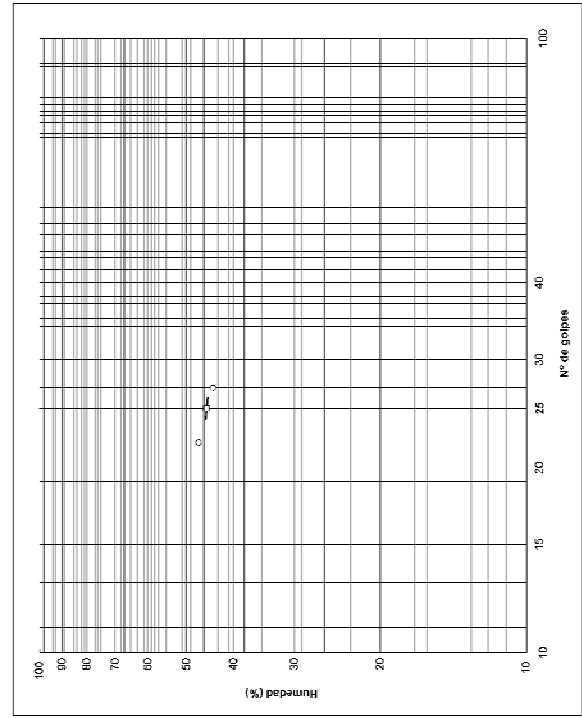
LÍMITES DE ATTERBERG
(UNE 103-103-94) (UNE 103-104-93)

Muestra N°: Suelo1

LÍMITE LÍQUIDO		Nº de golpes	27	22
-		Ref. tara	34	30
a=(t+s)/(t-s)		Agua	2,33	2,28
hasta		Tara+suelo+agua	16,73	16,01
t+s		Tara+suelo	14,40	13,73
s=(t-s)/t		Tara	8,11	8,80
h=a/s*100		% Humedad	44,95	47,11

LÍMITE PLÁSTICO		Ref. tara	21	22
-		Agua	1,24	1,12
a=(t+s)/(t-s)		Tara+suelo+agua	38,14	36,28
hasta		Tara+suelo	33,96	32,16
t+s		Tara	4,84	4,83
s=(t-s)/t		Suelo	4,84	4,83
h=a/s*100		% Humedad	25,10	23,19

Límite líquido: **45,43**
Límite plástico: **24,14**
I. de plasticidad: **21,28**



LÍMITES DE ATTERBERG
(UNE 103-103-94) (UNE 103-104-93)

Muestra N°: **BETONITA SÓDICA**

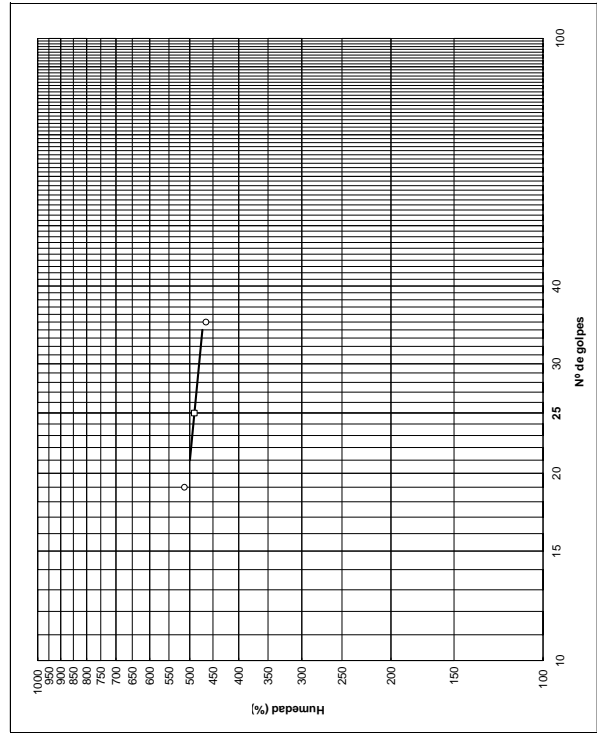
LÍMITE LÍQUIDO	
-	Nº de golpes
-	Ref. tara
-	35
-	19
-	11
a=(t+s+a)/(t+s)	Agua
8,73	8,73
t+s+a	Tara+suelo+agua
19,46	19,46
20,36	20,36
t+s	Tara+suelo
10,73	10,73
l	Tara
9,86	9,86
s=(t+s)-l	Suelo
8,87	8,87
h=a/s*100	% Humedad
464,36	464,36
512,30	512,30

LÍMITE PLÁSTICO	
-	Ref. tara
-	21
-	22
-	2,10
a=(t+s+a)/(t+s)	Agua
2,02	2,02
t+s+a	Tara+suelo+agua
37,13	37,13
37,70	37,70
t+s	Tara+suelo
35,14	35,14
35,60	35,60
l	Tara
3,16	3,16
s=(t+s)-l	Suelo
3,27	3,27
h=a/s*100	% Humedad
64,13	64,13
64,22	64,22

Límite líquido: **489.56**

Límite plástico: **64.17**

I .de plasticidad: **425.39**



LÍMITES DE ATTERBERG
(UNE 103-103-94) (UNE 103-104-93)

Muestra: **Bentonita1 (06/04/2005-07/04/2005)**

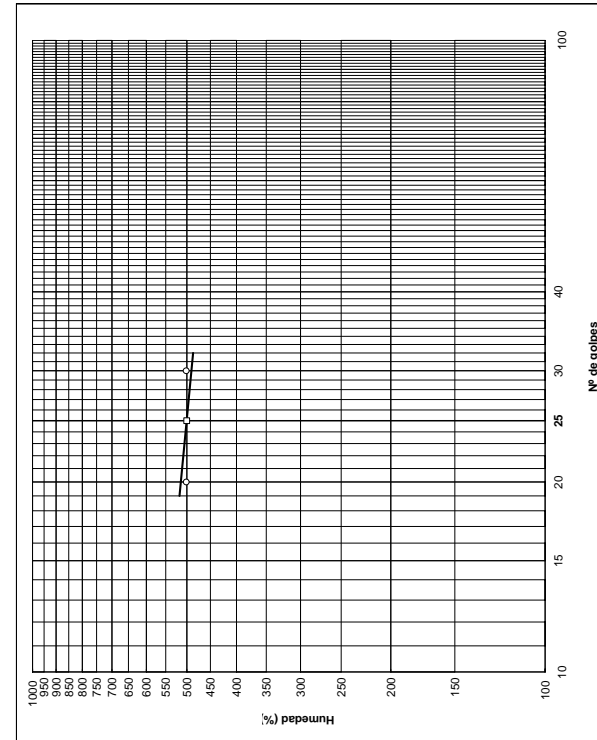
LÍMITE LÍQUIDO	
-	Nº de golpes
-	Ref. tara
-	7
-	30
-	11
a=(t+s+a)/(t+s)	Agua
17,30	17,30
16,30	16,30
t+s+a	Tara+suelo+agua
63,10	63,10
59,10	59,10
t+s	Tara+suelo
46,80	46,80
42,80	42,80
l	Tara
42,35	42,35
39,55	39,55
s=(t+s)-l	Suelo
3,45	3,45
3,25	3,25
h=a/s*100	% Humedad
507,45	507,45
501,54	501,54

LÍMITE PLÁSTICO	
-	Ref. tara
-	22
-	23
-	2,59
a=(t+s+a)/(t+s)	Agua
2,63	2,63
2,59	2,59
t+s+a	Tara+suelo+agua
39,83	39,83
39,82	39,82
t+s	Tara+suelo
36,20	36,20
37,23	37,23
l	Tara
32,33	32,33
33,33	33,33
s=(t+s)-l	Suelo
3,87	3,87
3,90	3,90
h=a/s*100	% Humedad
67,96	67,96
66,41	66,41

Límite líquido: **500.44**

Límite plástico: **67.18**

I .de plasticidad: **433.26**

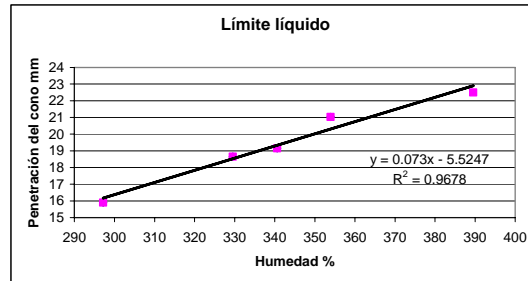


ENSAYO Nº	1		2		3		4			5	
PENETRACIÓN (mm)	19.1	19.2	18.8	18.5	15.8	16	20.4	21.4	21.3	22.4	22.6
PENETRACIÓN MEDIA	19.15		18.65		15.9		21.03			22.5	
Nº TARA	35		38		36		41			37	
TARA+SUELO+AGUA (gr)	27.81		37.08		33.6		27.45			30.13	
TARA+SUELO (gr)	17.49		18.23		17.88		16.62			17.86	
TARA (gr)	14.46		12.51		12.59		13.56			14.71	
HUMEDAD %	340.59		329.55		297.16		353.92			389.52	

MUESTRA Nº 1

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Bentonita sódica amasada a una humedad proxima a su límite líquido



HUMEDAD	PENETRACIÓN
340.59	19.15
329.55	18.65
297.16	15.9
353.92	21.03333
389.52	22.5

Recta de ajuste $y=aX+b$

a	b
0.073	-5.5247

LÍMITE LÍQUIDO

349.6534

	Suelo1	Bentonita
Peso específico de partículas (kN/m^3)	26.6	27.2-28.3

ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

ENSAYO DE COMPACTACIÓN

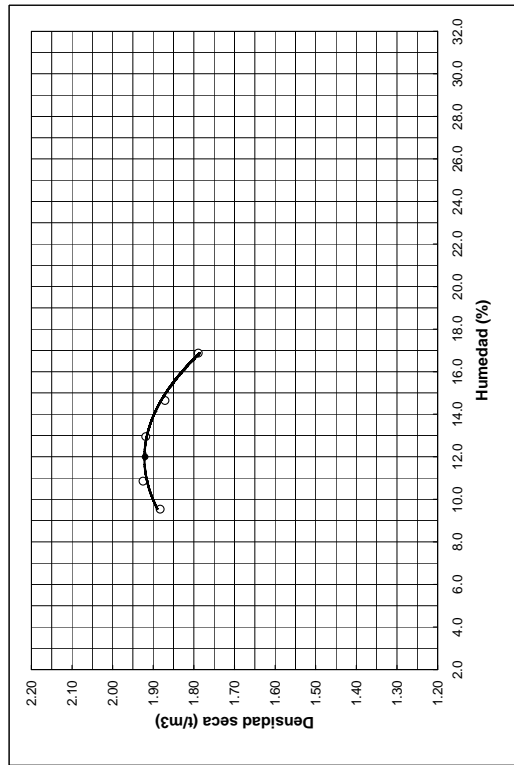
PROCTOR MODIFICADO (UNE 103-501-94)

Muestra Nº: Suelo 1

Tipo de ensayo: **Proctor Modificado**

Densidad máxima: **1.92 (t./m³)**

Humedad óptima: **12.00 (%)**



Molde: **Proctor Modificado**

Material utilizado: **100 (%)**

Maza: **Proctor Modificado**

(%) de material grueso (1):

Altura de caída: **47,5 cm**

Peso específico del material grueso:

Nº de capas: **5**

(1) Se denomina material grueso al no utilizado

Nº de golpes por capa: **60**

(1) Se denomina material grueso al no utilizado

Observaciones:

ENSAYO DE COMPACTACIÓN

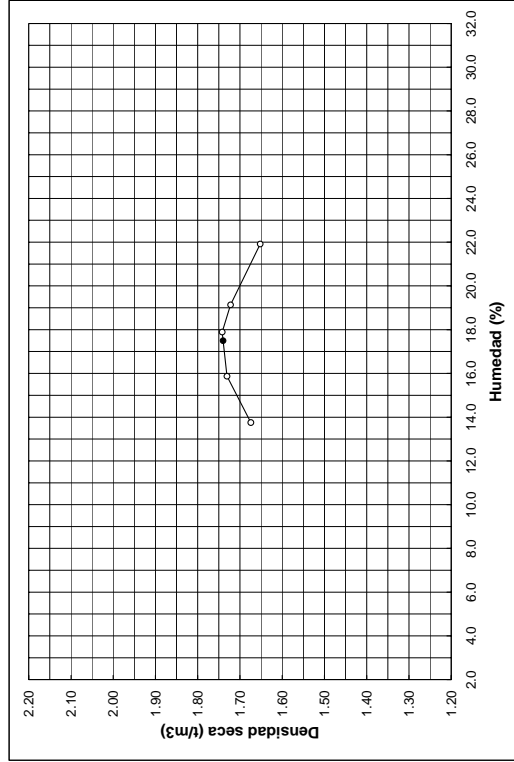
PROCTOR NORMAL (UNE 103-500-94)

Muestra Nº: Suelo 1

Tipo de ensayo: **Proctor**

Densidad máxima: **1.74 (t./m³)**

Humedad óptima: **17.50 (%)**



Molde: **Proctor**

Material utilizado: **100 (%)**

Maza: **Proctor**

(%) de material grueso (1):

Altura de caída: **30 cm**

Peso específico del material grueso:

Nº de capas: **3**

(1) Se denomina material grueso al no utilizado

Nº de golpes por capa: **26**

(1) Se denomina material grueso al no utilizado

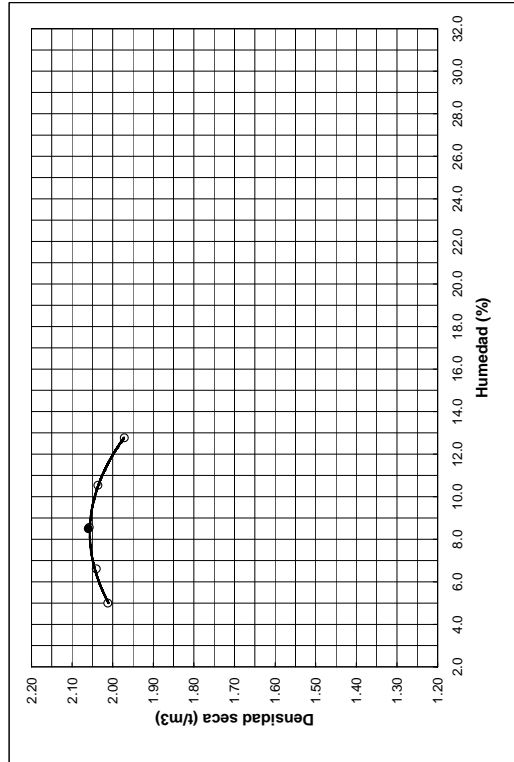
Observaciones:

ENSAYO DE COMPACTACIÓN

PROCTOR MODIFICADO (UNE 103-501-94)

Muestra Nº: Suelo 2

Tipo de ensayo: **Proctor Modificado**
 Densidad máxima: **2.06 (t./m³)**
 Humedad óptima: **8.50 (%)**



Molde: **Proctor Modificado** Material utilizado: **100 (%)**
 Mazza: **Proctor Modificado** (%) de material grueso (1):
 Altura de caída: **47,5 cm** Peso específico del material grueso:
 Nº de capas: **5**
 Nº de golpes por capa: **60** (1) Se denomina material grueso al no utilizado

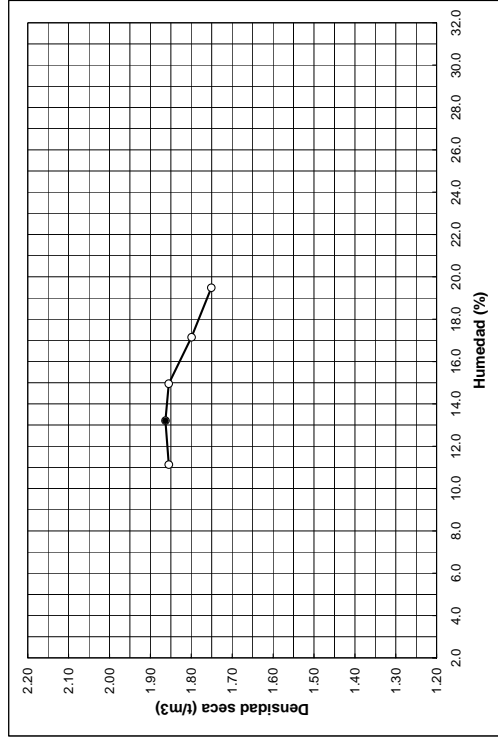
Observaciones:

ENSAYO DE COMPACTACIÓN

PROCTOR NORMAL (UNE 103-500-94)

Muestra Nº: Suelo 2

Tipo de ensayo: **Proctor**
 Densidad máxima: **1.86 (t./m³)**
 Humedad óptima: **13.21 (%)**



Molde: **Proctor** Material utilizado: **100 (%)**
 Mazza: **Proctor** (%) de material grueso (1):
 Altura de caída: **30 cm** Peso específico del material grueso:
 Nº de capas: **3**
 Nº de golpes por capa: **26** (1) Se denomina material grueso al no utilizado

Observaciones:

ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN QUÍMICA DE LA BENTONITA

Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales

Análisis de Bentonitas

19 de junio de 2007

Técnica: Fluorescencia de Rayos X

Equipo: ARL ADVANT XP

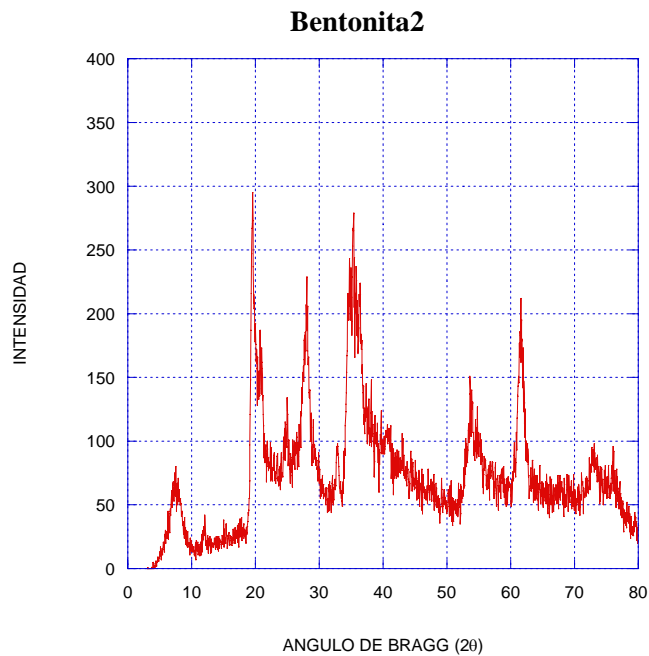
Preparación de muestras: Perla (relación muestra:fundente 1:11)

Programa Calibrado UC_MAN

Resultados en % en peso

MUESTRA	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	Fe2O3	K2O	MnO	Na2O	Cr2O3	P2O5	SO3	TiO2	LOI*
Bentonita	1.85	52.5	16.3	2.41	8.51	0.42	0.07	2.47	<0.01	0.16	0.32	0.62	14.4

LOI (pérdida al fuego): Elementos ligeros no analizables o fuera de calibración (CO2, H2O etc.)



ENSAYOS EDOMÉTRICOS DE LA BENTONITA

ENSAYO EDOMÉTRICO

(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 1 Bentonita2

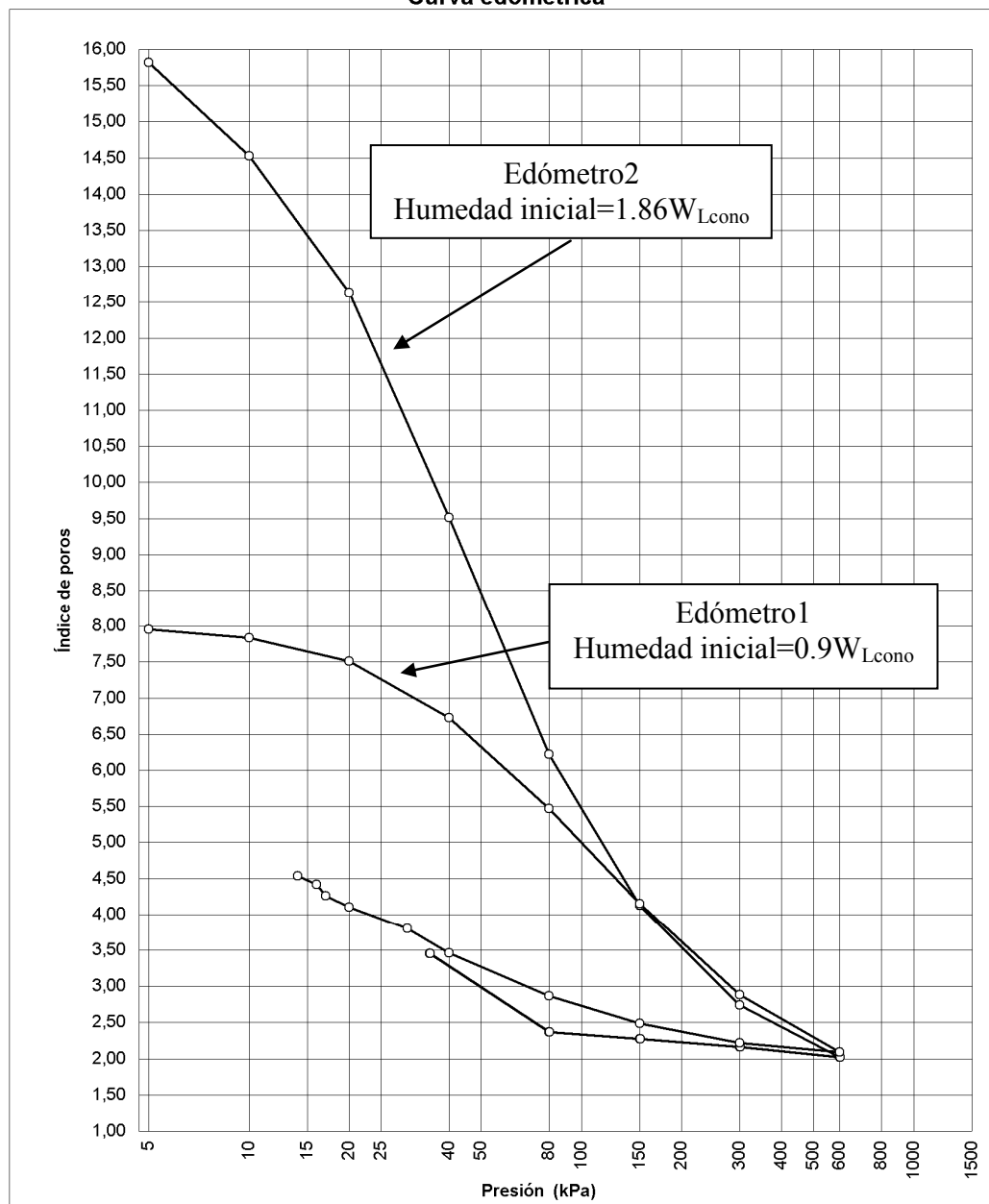
Peso específico de partículas:

2,74 gr/cm³

Humedad final:

125,9 %

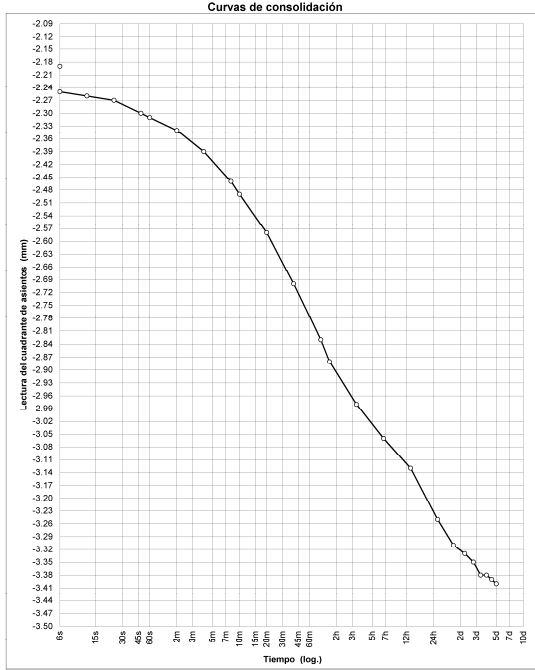
Curva edométrica



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 1 Bentonita2

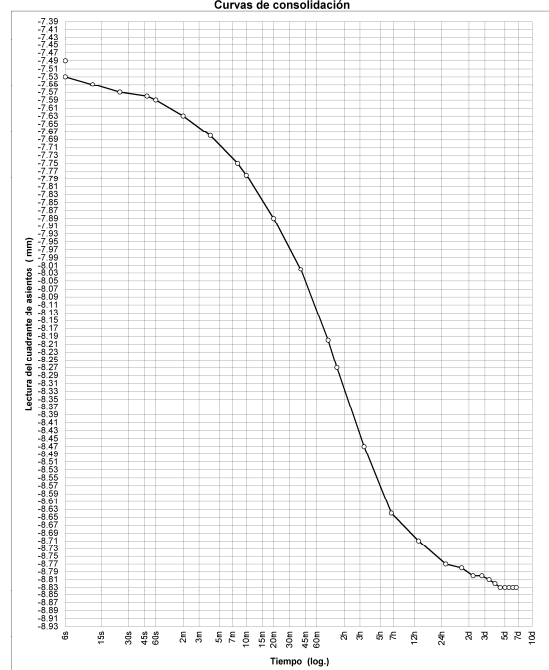
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 10 a 20



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 1 Bentonita2

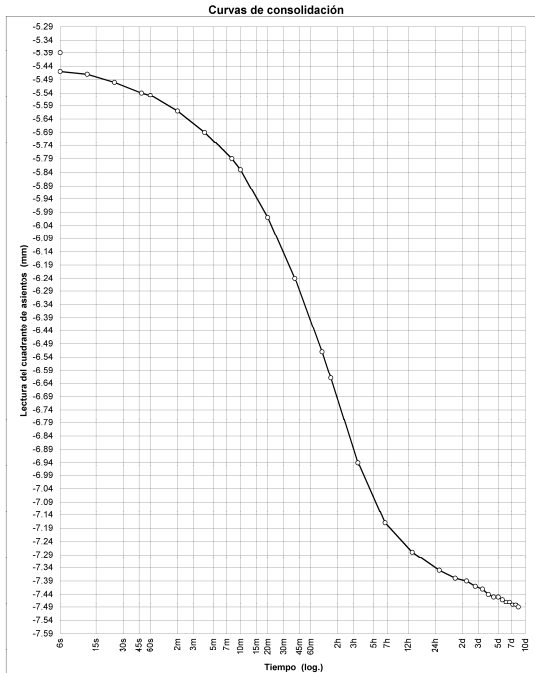
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 80 a 150



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 1 Bentonita2

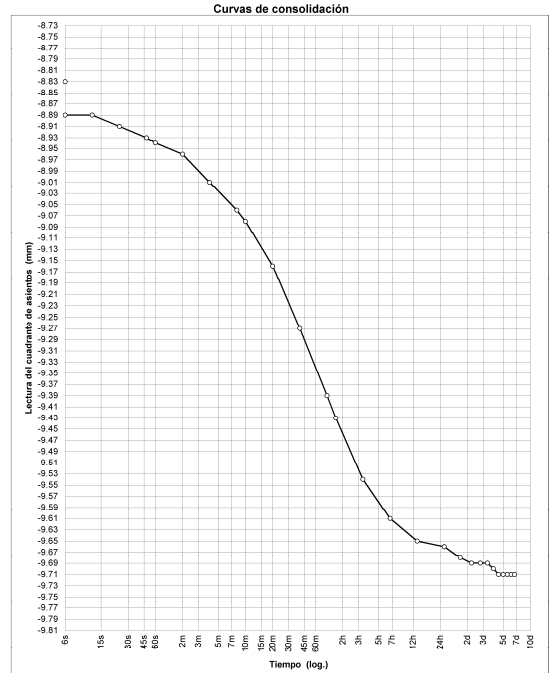
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 40 a 80



ENSAYO EDOMÉTRICO
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 1 Bentonita2

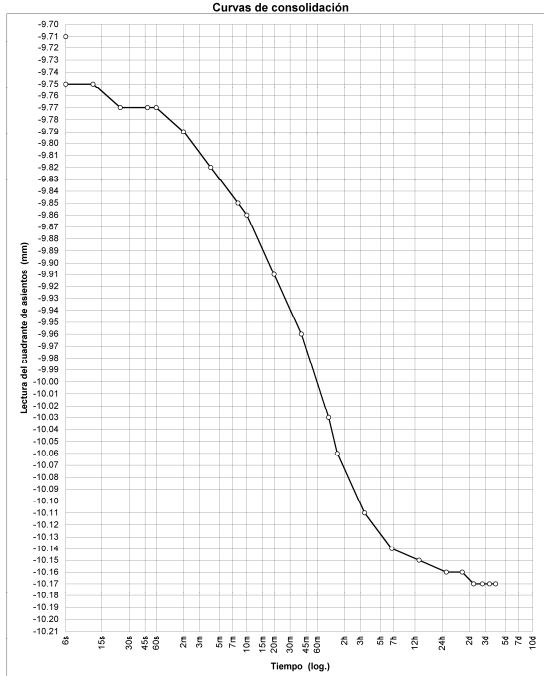
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 150 a 300



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

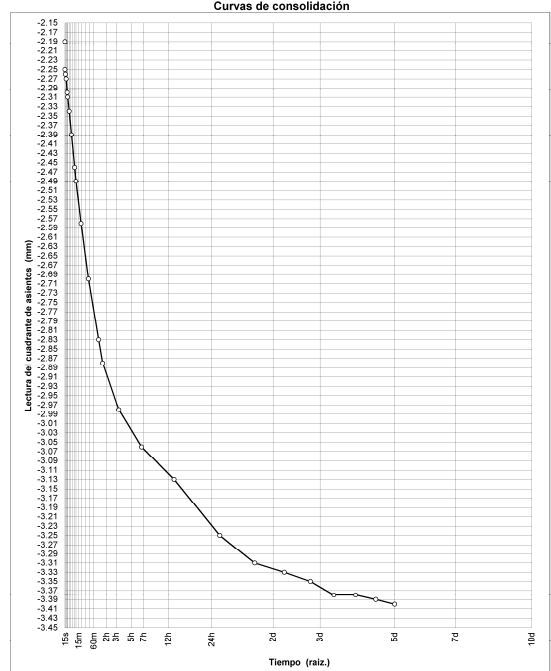
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 300 a 600



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

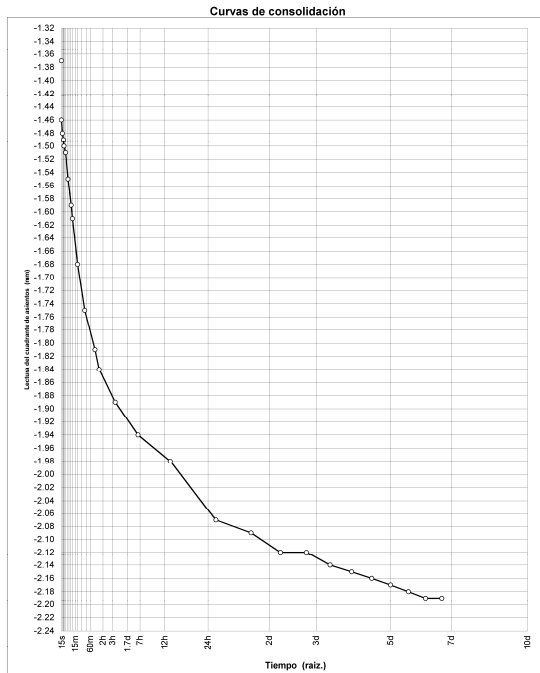
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 10 a 20



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

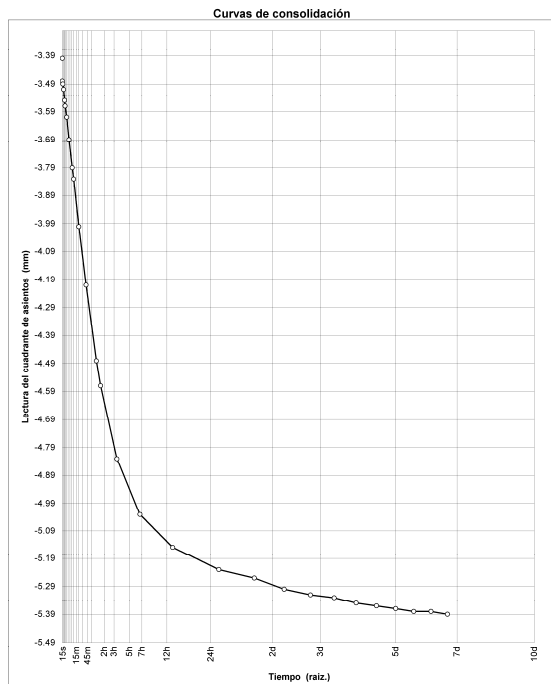
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 5 a 10



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

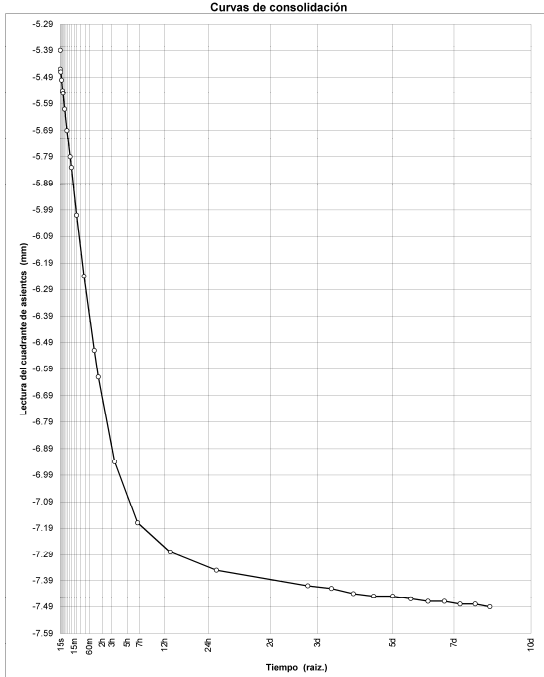
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 20 a 40



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

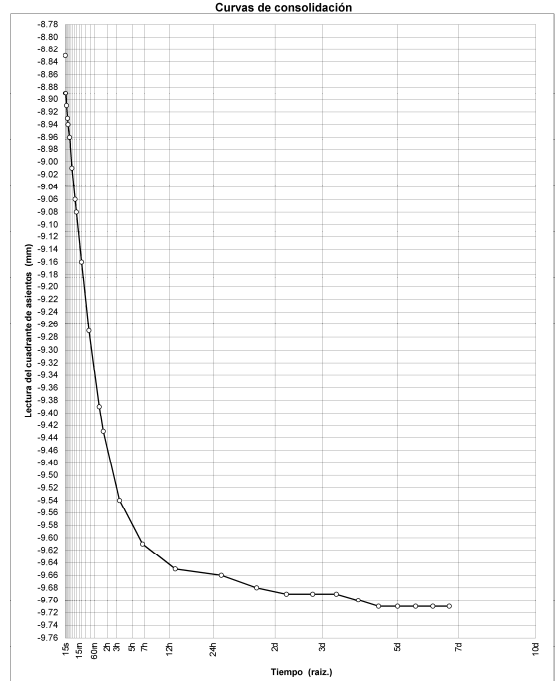
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 40 a 80



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

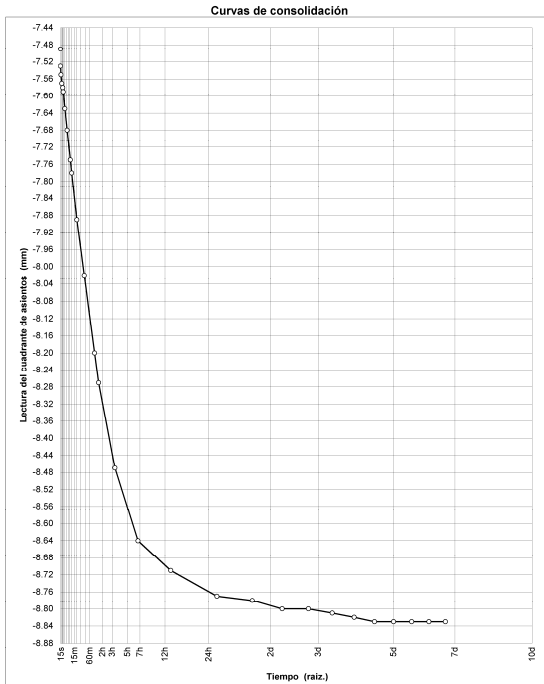
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 150 a 300



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

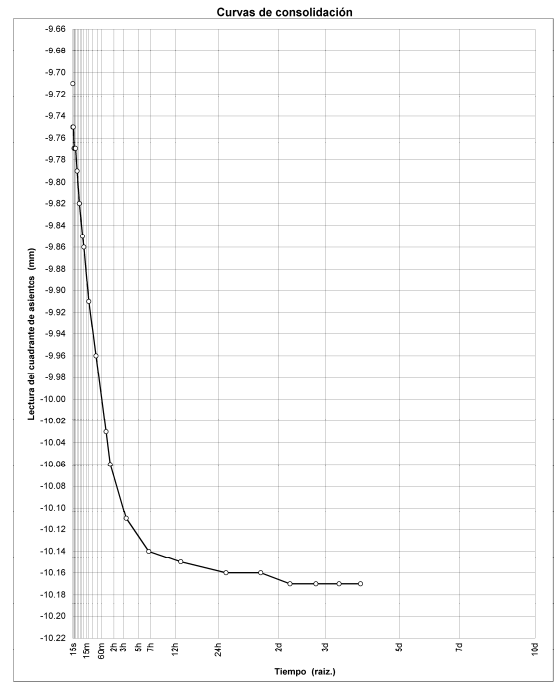
Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 80 a 150



ENSAYO EDOMÉTRICO 1
(UNE 103-405-94)

Muestra Nº: 1 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (mm): -0.01
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 300 a 600

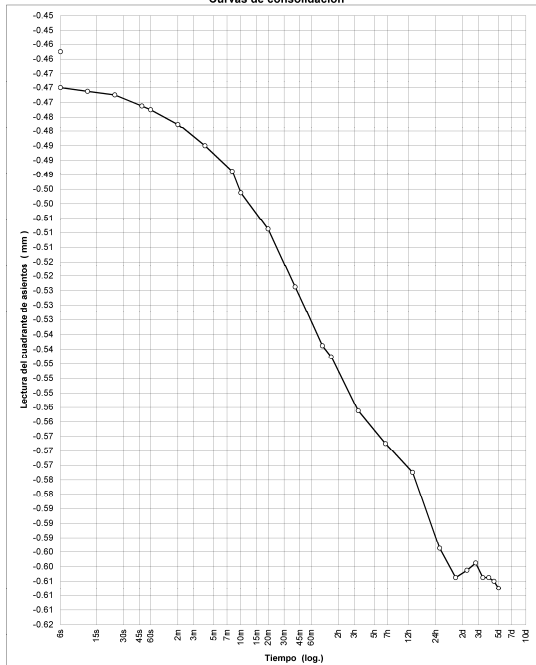


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 5 a 10

Curvas de consolidación

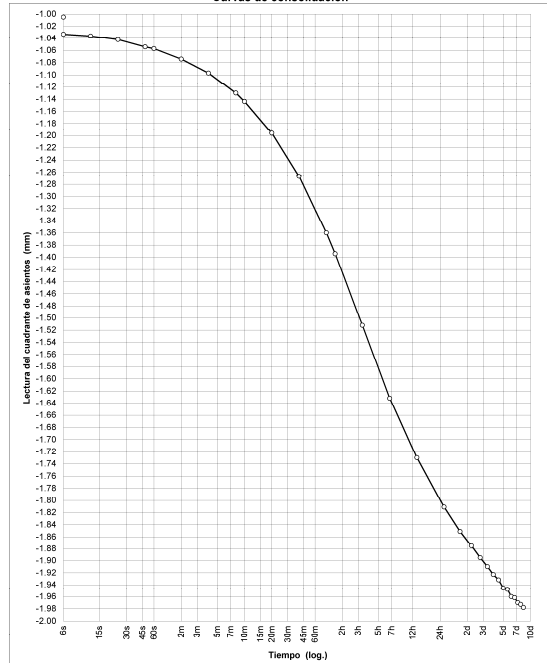


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 20 a 40

Curvas de consolidación

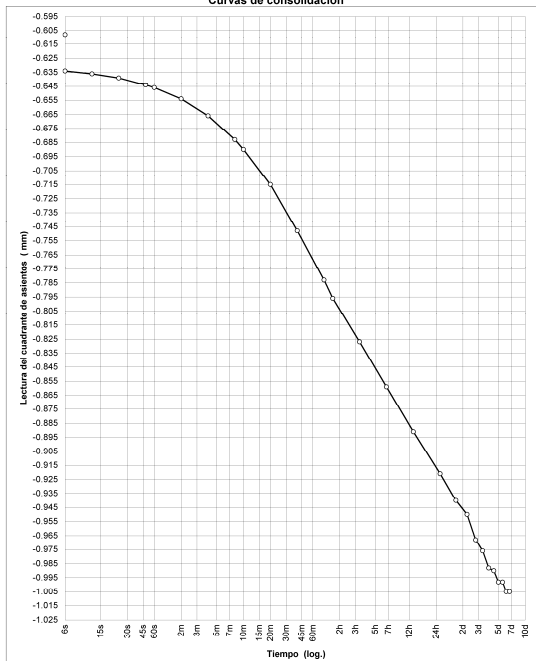


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 10 a 20

Curvas de consolidación

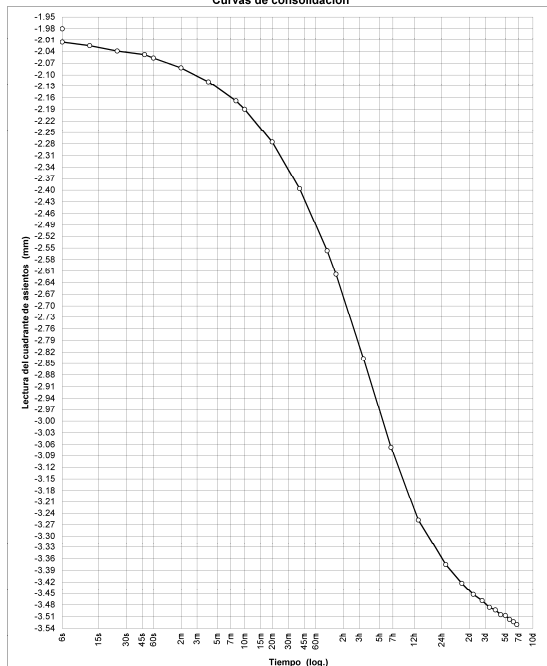


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 40 a 80

Curvas de consolidación

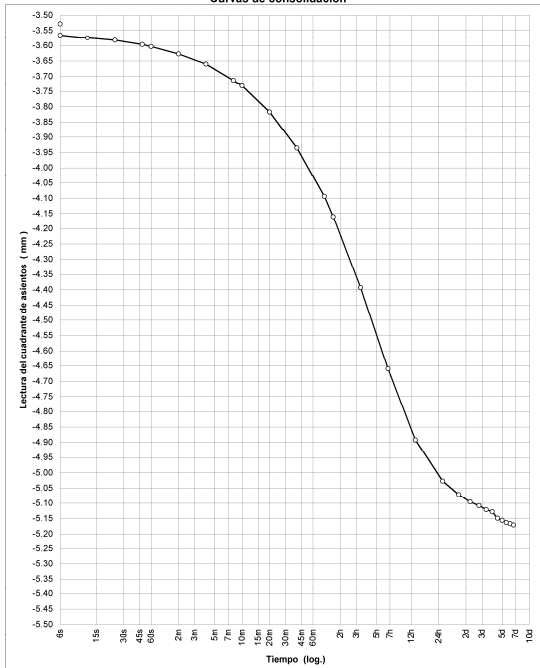


ENSAYO EDOMÉTRICO
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 80 a 150

Curvas de consolidación

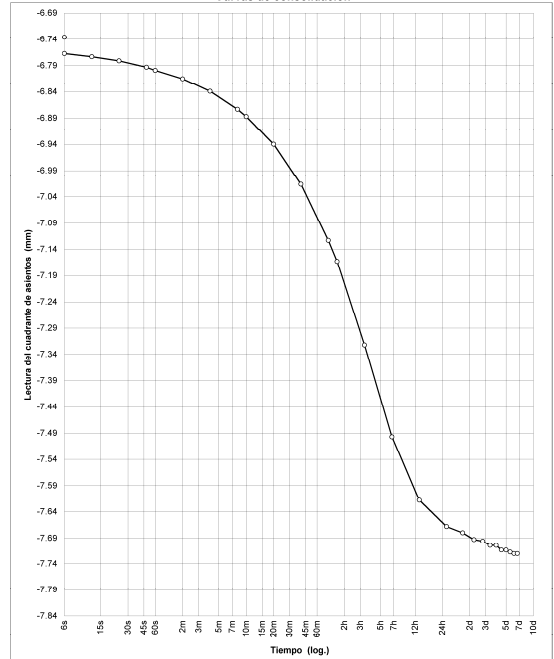


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 300 a 600

Curvas de consolidación

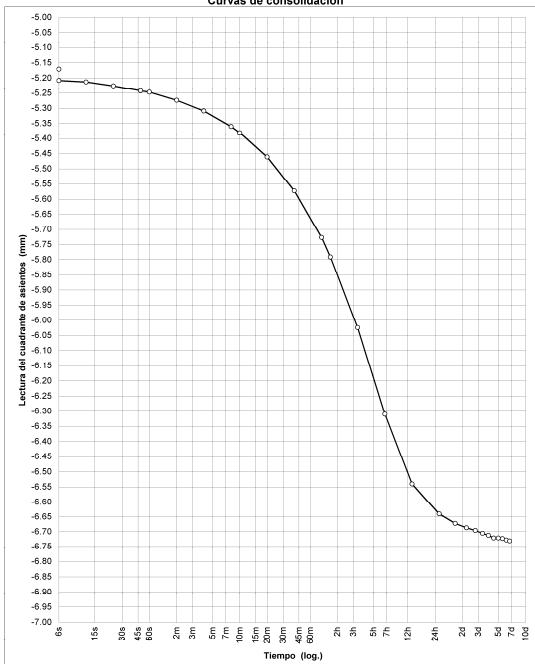


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 150 a 300

Curvas de consolidación

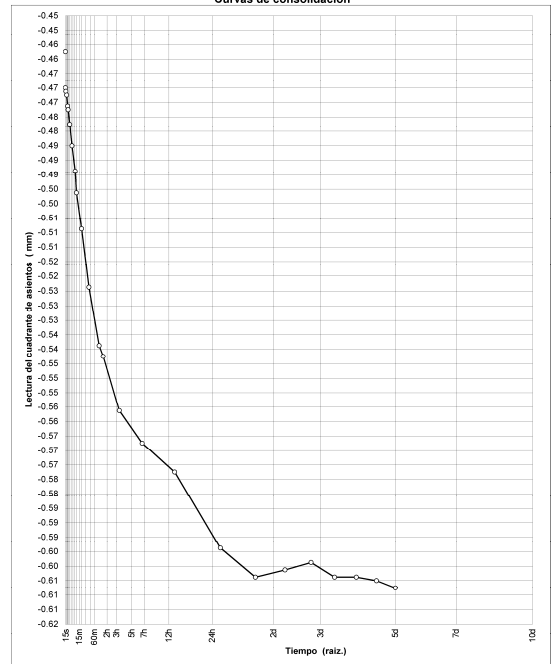


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 5 a 10

Curvas de consolidación

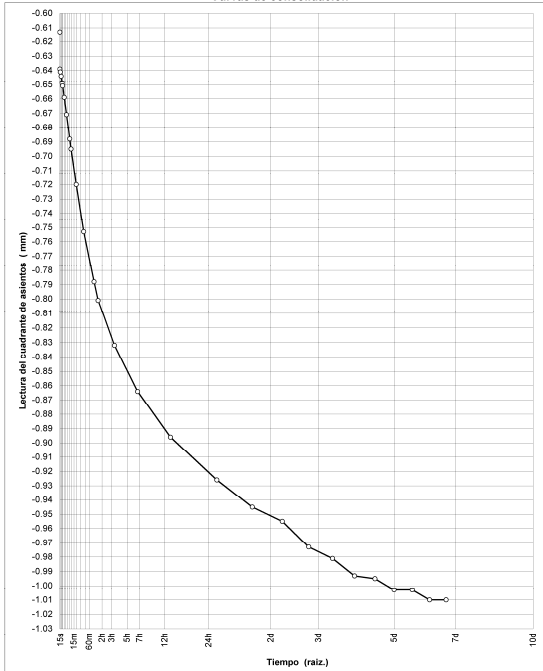


ENSAYO EDOMÉTRICO
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 10 a 20

Curvas de consolidación

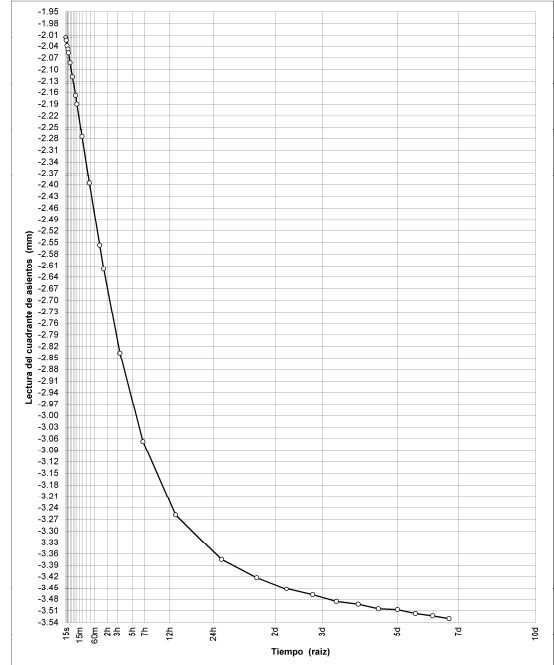


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 40 a 80

Curvas de consolidación

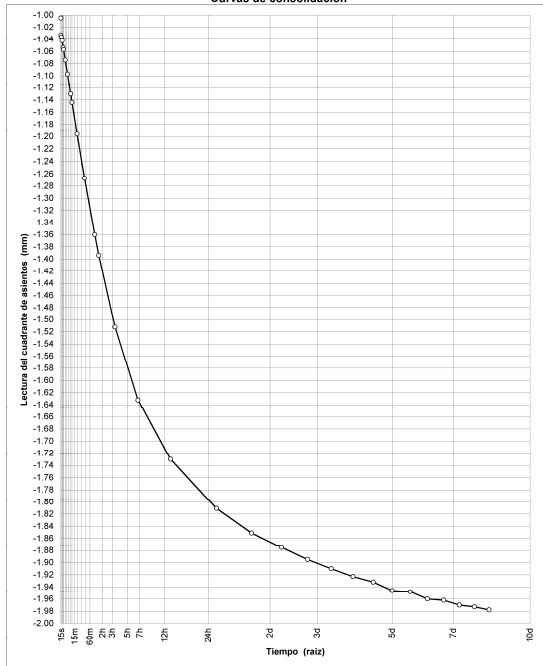


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 20 a 40

Curvas de consolidación

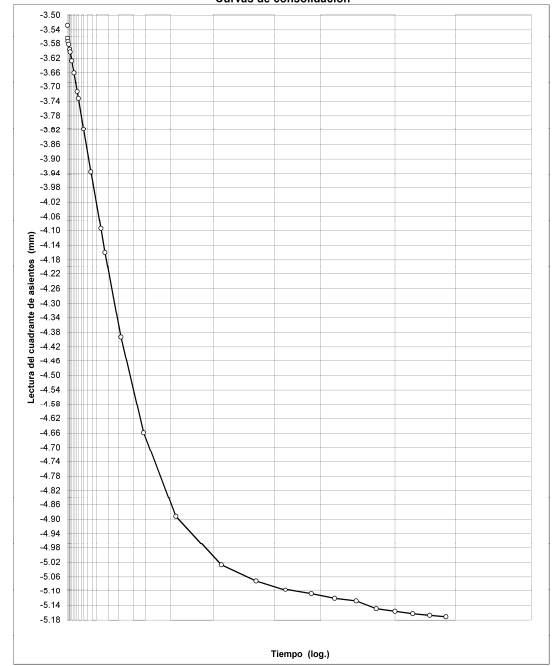


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0.01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 80 a 150

Curvas de consolidación

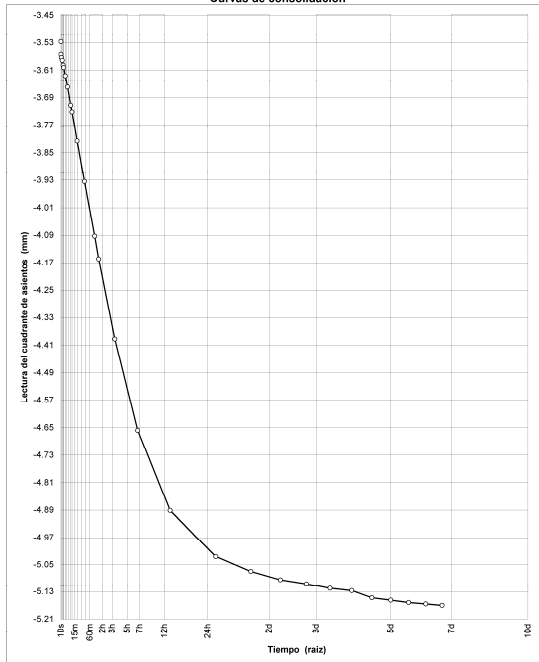


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 80 a 150

Curvas de consolidación

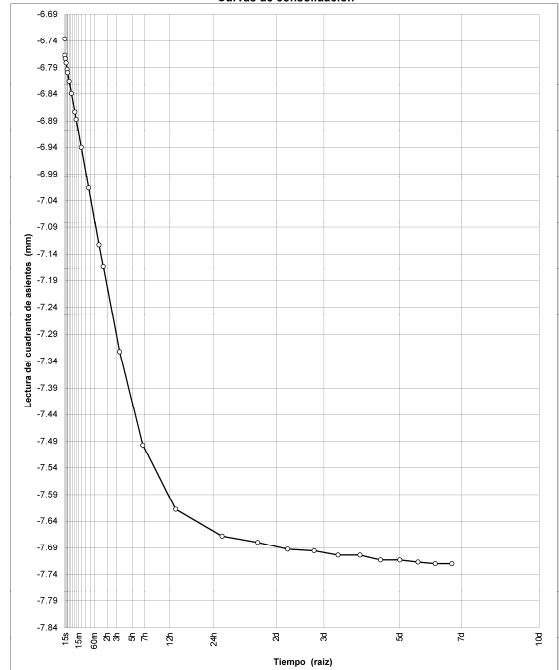


ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 300 a 600

Curvas de consolidación

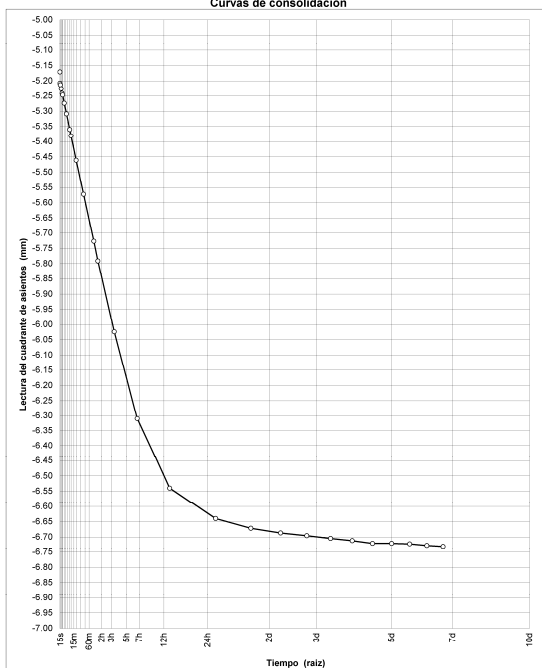


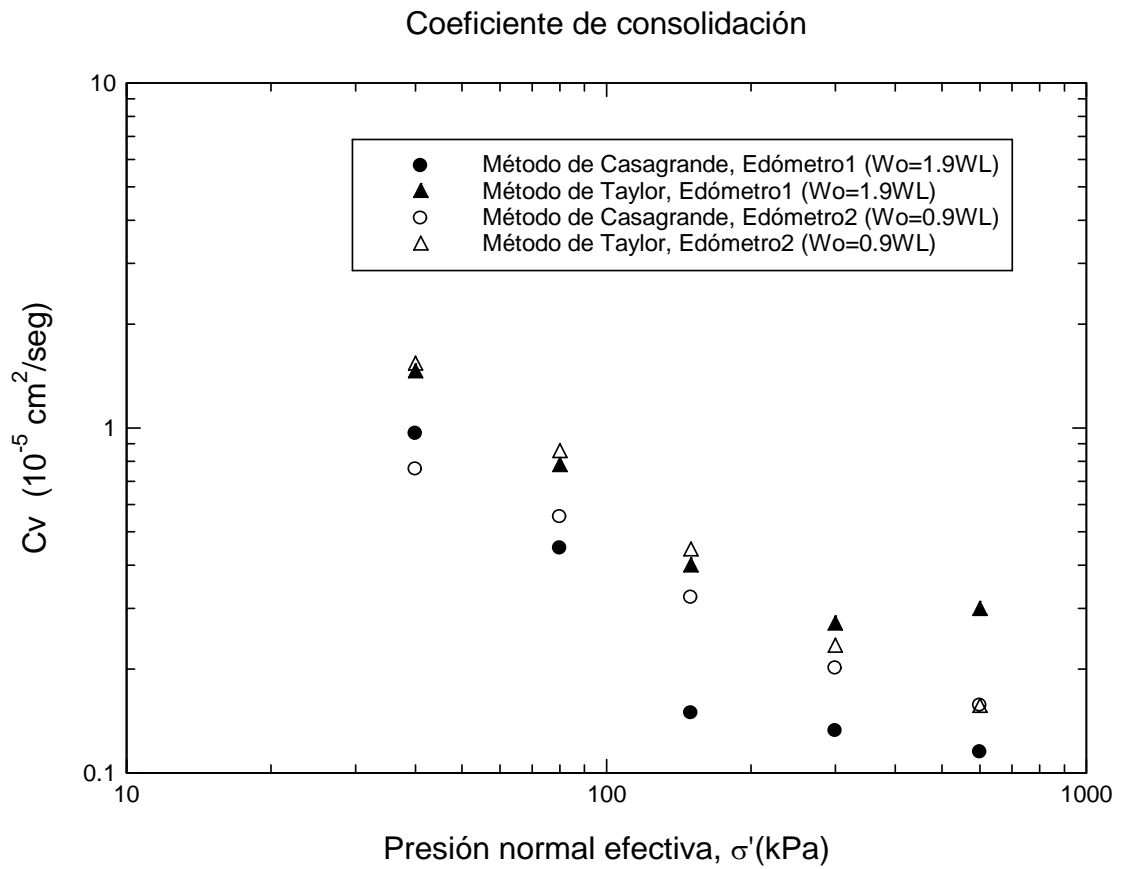
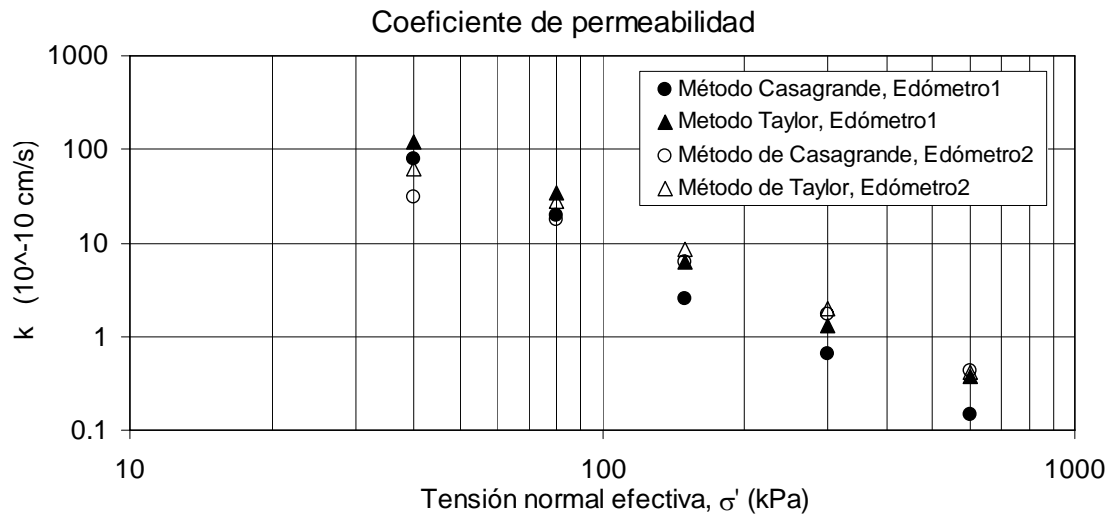
ENSAYO EDOMÉTRICO 2
(UNE 103-405-94)

Muestra N°: 2 Bentonita2

Diámetro de la probeta (mm): 45 Lectura inicial del ensayo (0,01mm): 0.00
 Altura inicial de la probeta (mm): 12 Escalón de carga (kPa) de: 150 a 300

Curvas de consolidación





ENSAYOS TRIAXIALES DE LA BENTONITA

Para la obtención de los parámetros resistentes de la bentonita, se han realizado ensayos de Compresión Triaxial sin Drenaje, obteniendo los valores de ángulo interno (ϕ) y cohesión (c).

La fabricación de las probetas se ha realizado con unos moldes, Figura 1, basados en los utilizados por Sánchez (1980), en los cuales se introduce la bentonita amasada con una humedad próxima a 2 veces su límite líquido. El motivo de esta elevada humedad es el de conseguir una muestra homogénea y fluida, evitando así la posible existencia de burbujas de aire en el interior de la probeta. Sobre el material se van colocando los pesos necesarios para la consolidación de la probeta a la presión deseada, este proceso dura entre 2 y 7 meses. Durante la consolidación, las muestras permanecen sumergidas para evitar el secado de las bases que se encuentran en contacto con el aire por medio de las perforaciones de la base y el pistón.

Los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales consolidados sin drenaje (C-U) se muestran en las siguientes gráficas. Los parámetros cohesión y ángulo de rozamiento que se obtiene realizando el ajuste según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb son $c = 5$ kPa y $\phi = 6^\circ$.

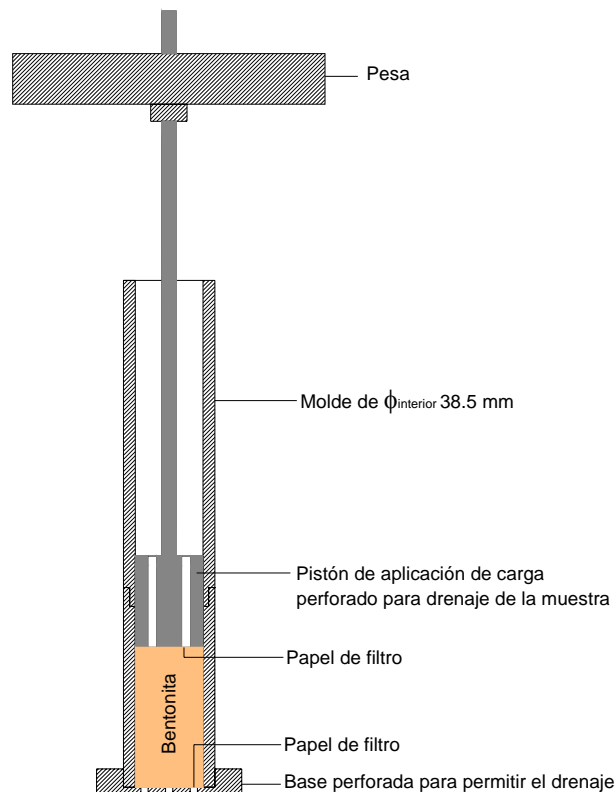


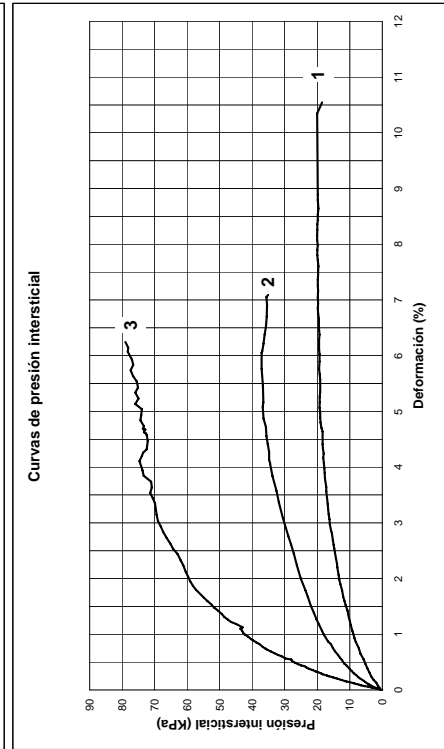
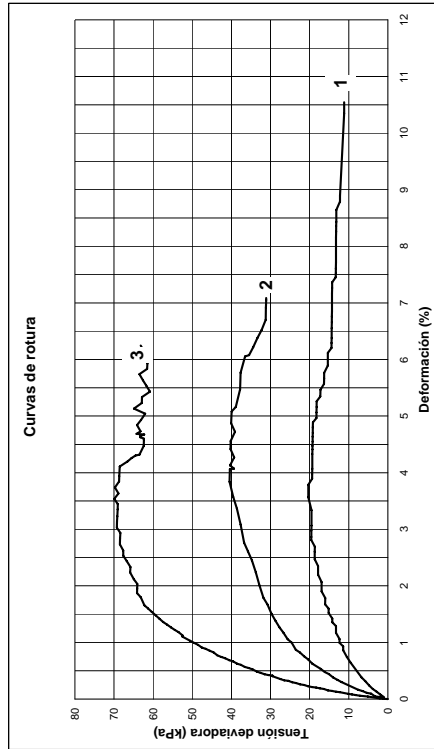
Figura 1 Molde para la fabricación de probetas de bentonita de 38.5 mm de diámetro

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL EN SUELOS

(UNE 103402:1998)

Muestra Nº: **Bentonita**

MUESTRA:	AMASADA				
TIPO DE ENSAYO:	C-U				
Probeta Nº:	1	2	3	4	5
Presión efectiva, σ_3 (kPa)	50	150	300		



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL EN SUELOS

(UNE 103402:1998)

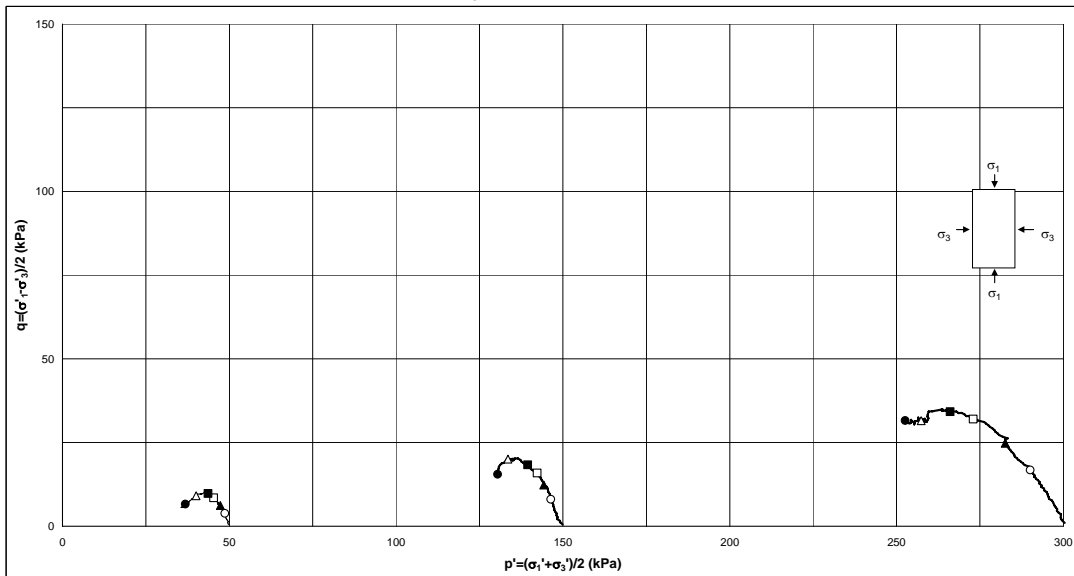
Probeta Nº:	1	2	3	4	5
P. efectiva, σ_3 (kPa)	50	150	300		
Diámetro, (mm)	38.10	38.10	38.10		
Alto, (mm)	76.20	76.20	76.20		
Humedad inicial, (%)	393.05	289.33	196.12		
Humedad final, (%)	321.46	209.87	153.19		
Densidad seca, (t/m ³)	0.23	0.30	0.41		
V. ensayo min. para 1% def	1524.00	1524.00	1524.00		

Muestra Nº: **Bentonita**
 Tipo de muestra: **AMASADA**
 Tipo de ensayo: **C-U**

Deformación (%)	
○ 0.5	■ 3.0
▲ 1.0	△ 5.0
□ 2.0	● 8.0

Observaciones:

Trayectorias de Tensiones



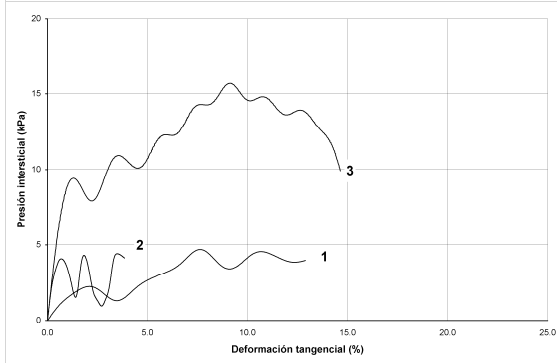
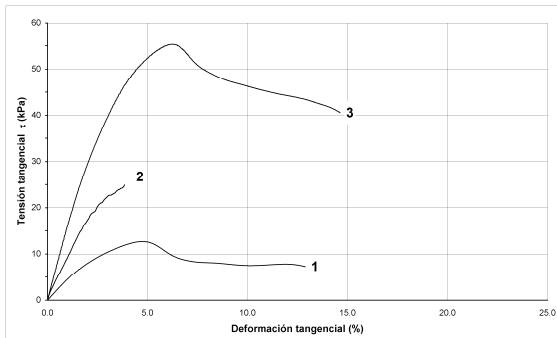
ENSAYOS DE CORTE SIMPLE DE LA BENTONITA

ENSAYO DE CORTE SIMPLE EN SUELOS

ASTM D 6528 - 00

Muestra N°: Bentonita2 Marrón

MUESTRA:	AMASADA						TIPO DE ENSAYO:	C-U					
Probeta N°:	1	2	3	4	5	6							
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300										

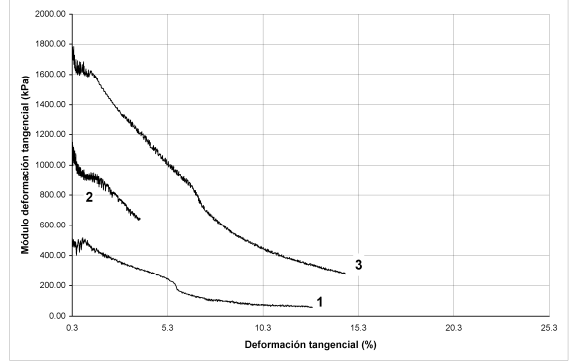
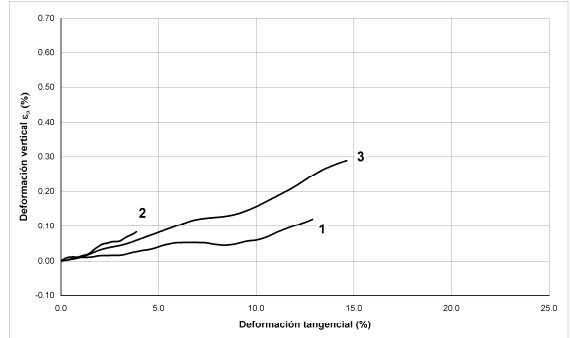


ENSAYO DE CORTE SIMPLE EN SUELOS

ASTM D 6528 - 00

Muestra N°: Bentonita Sódica

MUESTRA:	INALTERADA						TIPO DE ENSAYO:	C-U					
Probeta N°:	1	2	3	4	5	6							
Tensión normal σ (kPa)	50	100	300										



Probeta N°:	1	2	3	4	5	6
P. efectiva σ'_v (kPa)	50	100	150	150	300	300
Diámetro (mm)	70.00	70	70	70	70	70
Alto (mm)	19.00	19	14	18	19	19
Humedad inicial (%)	311.04	207.38	231.89	144.06	174.01	174.50
Humedad final (%)	303.21	198.79	203.15	143.08	149.39	132.80
Densidad seca (t/m³)	0.29	0.42	0.51	0.44	0.46	0.48
V. ensayo min. para 1% def	211.11	211.11	155.56	200.00	211.11	211.11

Muestra N°: Bentonita2 Marrón

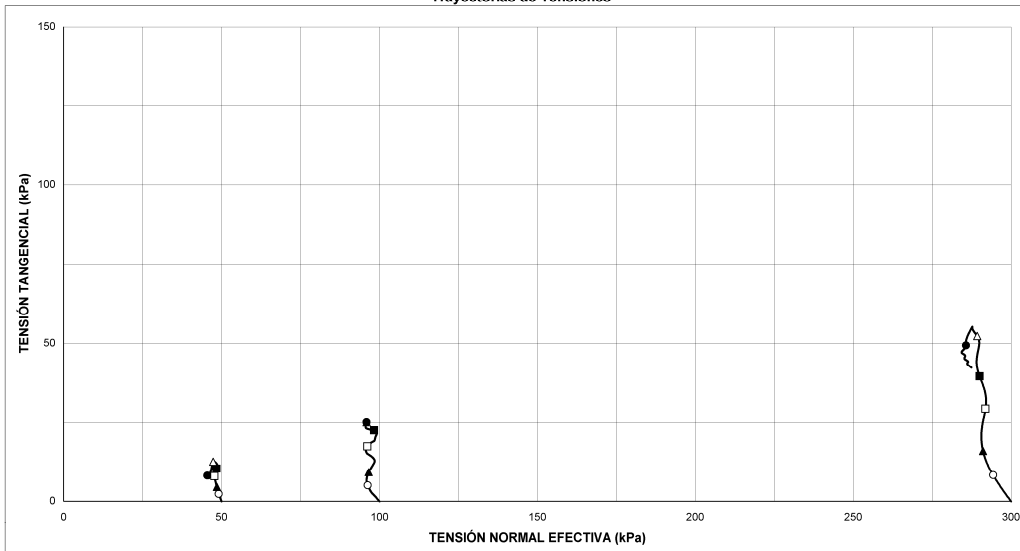
Tipo de muestra: AMASADA

Tipo de ensayo: C-U

Deformación (%)	
○	0.5
▲	1.0
□	2.0
■	3.0
△	5.0
●	8.0

Observaciones:

Traectorias de Tensiones



Apéndice C

1 Summary of parameters

The tables below show the material constants values used to carry out the shear strength models and numerical analysis for each texture geomembrane/non-woven geotextile interface tested.

Table 1.1 Bulk and shear modulus of the geotextiles for md (machine direction) test direction

Geosynthetic	E(Pa)	K (Pa)	<i>G</i> (Pa)
GT_nwnp_mf	3e7	1e7	1.5e7
GT_nwnp_st	3.6e6	1.2e6	1.8e6
GT_nwhb_mf	7.5e7	2.5e7	3.7e7

Table 1.2 Bulk and shear modulus of the geomembrane

Geosynthetic	E(Pa)	K (Pa)	<i>G</i> (Pa)
GMr1	4.5e8	2e9	1.5e8
GMr2_s1	4.5e8	2e9	1.5e8
GMr2_s2	4.5e8	2e9	1.5e8
GMr3	5.1e8	2.1e9	1.8e8
GMr4	4.5e8	2e9	1.5e8

Table 1.3 q and r constants to calculate interface normal stiffness (Pa/m)

Geotextile	Geomembrane	q	r
GT_nwnp_mf	GMr1	3e-8	9e-6
	GMr2_s1	4e-8	1e-5
	GMr2_s2	4e-8	1e-5
	GMr3	5e-8	1e-5
	GMr4	2e-8	5e-6
GT_nwnp_st	GMr1	4e-8	1e-5
	GMr2_s1	7e-8	2e-5
	GMr2_s2	8e-8	2e-5
	GMr3	6e-8	1e-5
	GMr4	3e-8	9e-6
GT_nwhb_mf	GMr1	2e-8	8e-6
	GMr2_s1	4e-8	1e-5
	GMr2_s2	3e-8	1e-5
	GMr3	4e-8	9e-6
	GMr4	1e-8	6e-6

Table 1.4 Residual friction angles for shear strength model

Interface	ϕ_r (degrees)
GMr1/GT_nwnp_mf	13
GMr1/GT_nwhb_mf	14
GMr1/GT_nwnp_st	12
GMr2_s1/GT_nwnp_mf	11
GMr2_s1/GT_nwhb_mf	11
GMr2_s1/GT_nwnp_st	11
GMr2_s2/GT_nwnp_mf	12
GMr2_s2/GT_nwhb_mf	12
GMr2_s2/GT_nwnp_st	12
GMr3/GT_nwnp_mf	12
GMr3/GT_nwhb_mf	12
GMr3/GT_nwnp_st	13
GMr4/GT_nwnp_mf	11
GMr4/GT_nwhb_mf	12
GMr4/GT_nwnp_st	13

Table 1.5 Geotextile reference compression stress

Geotextiles	<i>GCS</i> (kPa)
GT_nwnp_mf	15000
GT_nwnp_st	4000
GT_nwhb_mf	35000

Table 1.6 Hook and loop parameter

Geotextile	Geomembrane	HL
GT_nwnp_mf	GMr1	3.6
	GMr2_s1	4.0
	GMr2_s2	3.0
	GMr3	6.0
	GMr4	2.5
GT_nwnp_st	GMr1	4.5
	GMr2_s1	7.0
	GMr2_s2	3.6
	GMr3	8.4
	GMr4	3.0
GT_nwhb_mf	GMr1	4.0
	GMr2_s1	4.5
	GMr2_s2	4.0
	GMr3	5.4
	GMr4	2.6

Table 1.7 Constants M and N for the interbedding parameter

Geotextile	Geomembrane	M	N	cc
GT_nwnp_mf	GMr1	0.2730	0.6717	0.998
	GMr2_s1	0.2432	0.6735	0.997
	GMr2_s2	0.3265	0.6486	0.998
	GMr3	0.1621	0.6556	0.997
	GMr4	0.3467	0.6772	0.9989
GT_nwnp_st	GMr1	0.1336	0.7930	0.998
	GMr2_s1	0.086	0.7904	0.998
	GMr2_s2	0.1655	0.7810	0.998
	GMr3	0.0826	0.7782	1.000
	GMr4	0.2222	0.7292	0.998
GT_nwhb_mf	GMr1	0.2929	0.6150	0.998
	GMr2_s1	0.2632	0.6315	0.998
	GMr2_s2	0.2950	0.6347	0.998
	GMr3	0.2011	0.6302	0.998
	GMr4	0.4065	0.6321	0.999

Table 1.8 Fit parameters for the equation $\delta_{peak}=a+b\sigma_n$ (δ_{peak} in mm and σ_n in kPa)

Geotextile	Geomembrane	a	b	cc
GT_nwnp_mf	GMr1	4.6	0.0062	0.989
	GMr2_s1	4.9	0.0010	-
	GMr2_s2	5.2	0.0142	0.938
	GMr3	4.6	0.0161	0.827
	GMr4	2.5	0.0142	0.997
GT_nwnp_st	GMr1	1.7	0.0096	0.814
	GMr2_s1	3	0.0093	0.736
	GMr2_s2	2.1	0.0078	0.587
	GMr3	3.2	0.0229	0.990
	GMr4	2.7	0.0125	0.993
GT_nwhb_mf	GMr1	1.6	0.0071	0.991
	GMr2_s1	2.2	0.0056	0.891
	GMr2_s2	2.1	0.0095	0.776
	GMr3	3.9	0.0082	0.688
	GMr4	0.6	0.0143	0.999

Tables with dimensionless parameters for each interfaces type:

GT_nwnp_mf/GMr1:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{peak}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100$ kPa
0	$-\Phi_{residual}/h$
0.4	0
0.6	0.3
1.0	1.0
1.5	0.8
2.0	0.5
3.0	0.3
4.0	0.3
$50/\bar{\delta}_{peak}$	0.3
$1000/\bar{\delta}_{peak}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{peak}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100$ kPa
0	$-\Phi_{residual}/h$
0.4	0
0.6	0.25
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	1.0
3.0	0.8
4.0	0.6
$50/\bar{\delta}_{peak}$	0.6
$1000/\bar{\delta}_{peak}$	0

GT_nwnp_mf/GMr2_s1:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{peak}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100$ kPa
0	$-\Phi_{residual}/h$
0.4	0
0.7	0.6
1.0	1.0
1.5	0.5
2.0	0.3
3.0	0.0
4.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{peak}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{peak}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{peak}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100$ kPa
0	$-\Phi_{residual}/h$
0.20	0
0.4	0.4
0.6	0.7
1.0	1.0
1.6	0.98
2.0	0.8
3.0	0.7
$50/\bar{\delta}_{peak}$	0.54
$1000/\bar{\delta}_{peak}$	0

GT_nwnp_mf/GMr2_s2:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{peak}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100$ kPa
0	$-\Phi_{residual}/h$
0.4	0
0.55	0.4
1.0	1.0
1.5	0.5
2.0	0.3
3.0	0.15
4.0	0.1
$50/\bar{\delta}_{peak}$	0.1
$1000/\bar{\delta}_{peak}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{peak}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100$ kPa
0	$-\Phi_{residual}/h$
0.2	0
0.4	0.3
0.6	0.6
1.0	1.0
1.5	0.9
2.0	0.8
3.0	0.6
$50/\bar{\delta}_{peak}$	0.5
$1000/\bar{\delta}_{peak}$	0

GT_nwnp_mf/GMr3:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.3	0
0.6	0.8
1.0	1.0
1.3	0.5
2.0	0.35
3.0	0.3
4.0	0.25
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.2
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.25	0
0.4	0.4
0.6	0.7
1.0	1.0
1.2	0.95
2.0	0.8
3.0	0.65
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.6
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwnp_mf/GMr4:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.5
1.0	1.0
1.5	0.6
2.0	0.3
3.0	0.1
4.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.6	0
0.95	0.4
1.5	1.0
2.0	0.95
2.5	0.8
3.0	0.7
4.0	0.2
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwnp_st/GMr1:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.45	0
0.6	0.4
1.0	1.0
1.5	0.5
2.0	0.3
3.0	0.1
4.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.6	0
0.8	0.7
1.0	0.9
1.1	1.0
2.0	0.95
3.0	0.5
4.0	0.3
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwnp_st/GMr2_s1:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.7	0.6
1.0	1.0
2.6	0.3
3.0	0.25
4.0	0.2
5.0	0.15
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.1
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.6	0
0.95	0.4
1.5	1.0
2.0	0.95
2.5	0.8
3.0	0.7
4.0	0.2
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwnp_st/GMr2_s2:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.5	0
0.6	0.3
1.0	1.0
1.5	0.4
2.0	0.2
3.0	0.1
4.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.5
1.1	1.0
1.5	0.98
2.0	0.95
3.0	0.2
4.0	0.15
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwnp_st/GMr3:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.6	0
1.2	0.6
2.5	1.0
3.0	0.3
4.0	0.2
3.0	0.1
5.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.65
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	0.85
3.0	0.7
4.0	0.6
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.44
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwnp_st/GMr4:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.5	0
0.6	0.3
1.0	1.0
1.5	0.8
2.0	0.5
3.0	0.2
4.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.5	0
0.75	0.7
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	0.95
3.0	0.93
4.0	0.6
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.4
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwhb_mf/GMr1:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.5
1.0	1.0
1.2	0.97
2.0	0.65
3.0	0.6
4.0	0.58
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.57
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.65
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	0.85
3.0	0.7
4.0	0.6
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.44
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwhb_mf/GMr2_s1:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.6
1.0	1.0
1.5	0.75
2.0	0.4
3.0	0.1
4.0	0.0
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.3	0
0.6	0.7
1.0	1.0
1.5	0.95
2.5	0.9
3.0	0.6
4.0	0.5
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.4
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwhb_mf/GMr2_s2:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.3	0
0.6	0.5
1.0	1.0
1.4	0.64
2.0	0.5
3.0	0.45
4.0	0.43
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.4
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.25	0
0.4	0.35
0.6	0.63
1.0	1.0
1.25	1.0
2.0	0.63
3.0	0.6
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.6
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwhb_mf/GMr3:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.5
1.0	1.0
1.5	0.5
2.0	0.4
3.0	0.3
4.0	0.28
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.25
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.3	0
0.6	0.7
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	0.25
3.0	0.23
4.0	0.1
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.0
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

GT_nwhb_mf/GMr4:

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n > 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.5	0
0.6	0.2
1.0	1.0
1.5	0.4
2.0	0.3
3.0	0.2
4.0	0.2
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.2
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

$\bar{\delta}/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	HL(mob)/HL(peak) $\sigma_n \leq 100 \text{ kPa}$
0	$-\Phi_{\text{residual}}/h$
0.4	0
0.6	0.8
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	0.8
3.0	0.6
4.0	0.4
$50/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0.2
$1000/\bar{\delta}_{\text{peak}}$	0

Apéndice D. Spreadsheet of the shear strength model

Spreadsheet to obtain shear stress vs. horizontal displacement curve for one normal stress. And comparison with the data from laboratory direct shear test 300x300 mm

Interface: geotextile/geomembrane

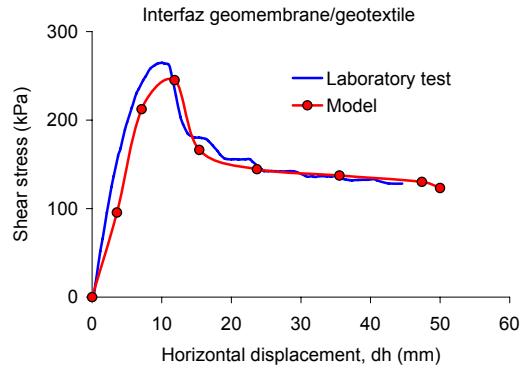
Geotextile GT_nwnp_mf
Geomembrane GMR3

Parameters	
GCS (kPa)	1.50E+04
HL	6.0
Parameter M	0.2
Parameter N	0.7
Interbedding, i	1.814
Normal stress, σ (kPa)	450
Residual angle, Φ_r (°)	12
Thickness (mm)	3.2
a	4.6
b	0.0161
HL * i*log(GCS/ σ)	16.6
dpeak=a+b* σ (mm)	11.8

Dimensionless co-ordinates	
dh/dpeak	HLmob/HL
0.00	-0.72
0.30	0.00
0.60	0.80
1.00	1.00
1.30	0.50
2.00	0.35
3.00	0.30
4.00	0.25
4.22	0.20
84.42	0.00

Data shear strength model	
dh (mm)	Shear stress (kPa)
0	0
3.5535	95.65045275
7.107	212.3545942
11.845	245.1261826
15.399	166.3628637
23.69	144.4998118
35.535	137.3509827
47.38	130.2650154
50	123.2381558
1000	95.65045275

Data direct shear test 300x300 mm		
σ (kPa)	450.00	
dh (mm)	Shear stress (kPa)	
0	0	
0.25	3.458213256	
0.59	20.7222073	
1.17	51.8181006	
1.51	66.28172281	
2.11	95.2526293	
2.78	124.5655428	
3.1	136.7034081	
3.72	159.3862177	
4.08	168.2570938	
4.72	189.1306538	
5.03	197.8392383	
5.71	214.0177888	
6.34	229.7814823	
6.7	235.3455818	
7.34	245.1310441	
7.66	248.9476699	
8.35	257.9963977	
9.03	262.0525592	
9.36	263.5877636	
10	264.691358	
10.37	263.8359779	
11.02	262.4652547	
11.34	254.0478121	
12.04	227.1724746	
12.69	203.6500544	
13.06	195.4393418	
13.7	184.9957374	
14.03	182.948339	
14.72	180.3047952	
15.36	180.36994	
15.72	179.7717491	
16.36	178.6317364	
16.68	176.4975182	
17.36	171.0172099	
18.04	164.9642737	
18.37	161.2961167	
19	156.869773	
19.37	156.0654329	
21.65	155.7130584	
22.99	153.3895881	
23.69	148.8244421	
24.34	144.3827934	
24.71	142.3309373	
25.35	142.3491791	
26.37	142.2349502	
27.06	141.8972945	
27.38	141.7095728	
28.03	142.2349502	
28.4	141.9733219	
29.05	141.9963009	
29.38	141.3570756	
30.06	138.4314287	
31.08	136.0130649	
32.04	135.7503814	
33.36	136.1445208	
33.72	136.3658037	
35.37	135.189958	
37.36	131.8361703	
42.59	128.3839359	
44.56	128.2418002	
46.9	127.438697	
49.55	126.1216113	



Apéndice E

Summary of shear strength model results

Comparison of the shear strength model with measured data is given for the following interfaces:

- Geomembranes/GT_nwhb_mf (Figure 1)
- Geomembranes/GT_nwnp_mf (Figure 2)
- Geomembranes/GT_nwnp_st (Figure 3)

Comparison of peak and post peak shear stress values of direct shear test with shear strength model is given for the following combinations:

- Geomembranes/GT_nwhb_mf (Figure 4)
- Geomembranes/GT_nwnp_mf (Figure 5)
- Geomembranes/GT_nwnp_st (Figure 6)

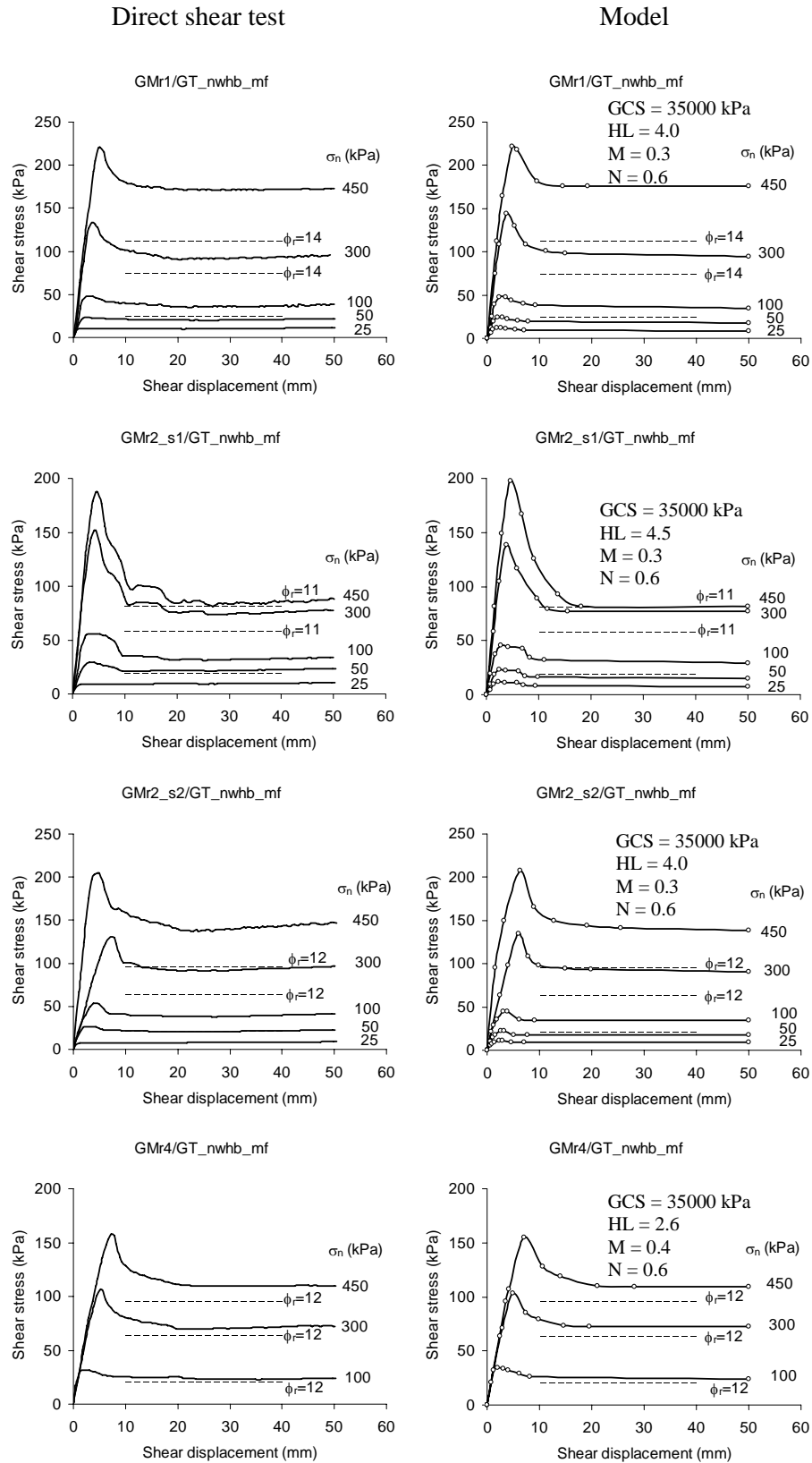


Figure 1 Comparison of shear stress-displacement data obtained from models and direct shear test of GT_nwhb_mf/Geomembranes interfaces

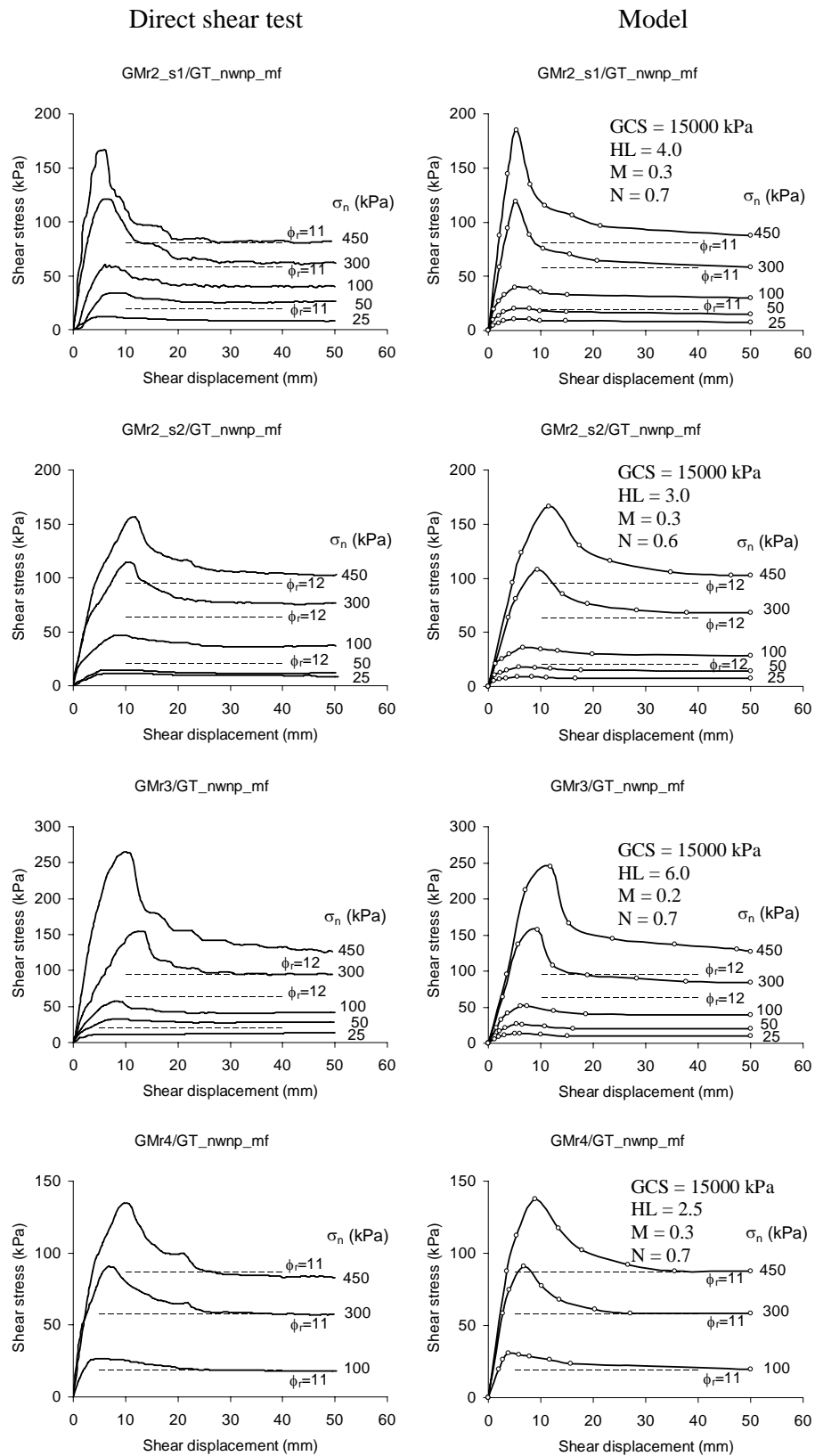


Figure 2 Comparison of shear stress-displacement data obtained from models and direct shear test of GT_nwnp_mf/Geomembranes interfaces

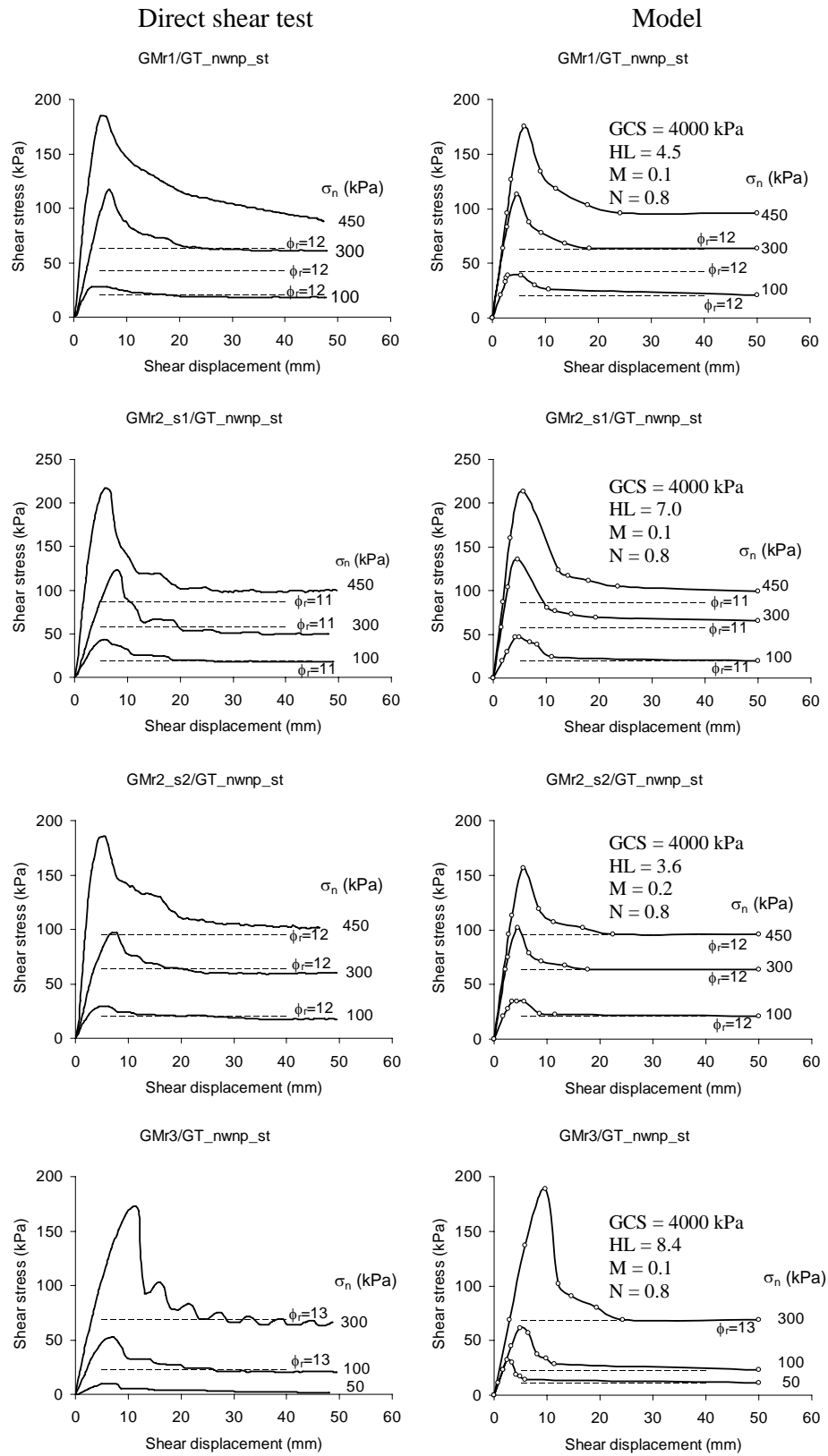


Figure 3 Comparison of shear stress-displacement data obtained from models and direct shear test of GT_nwnp_st/Geomembranes interfaces

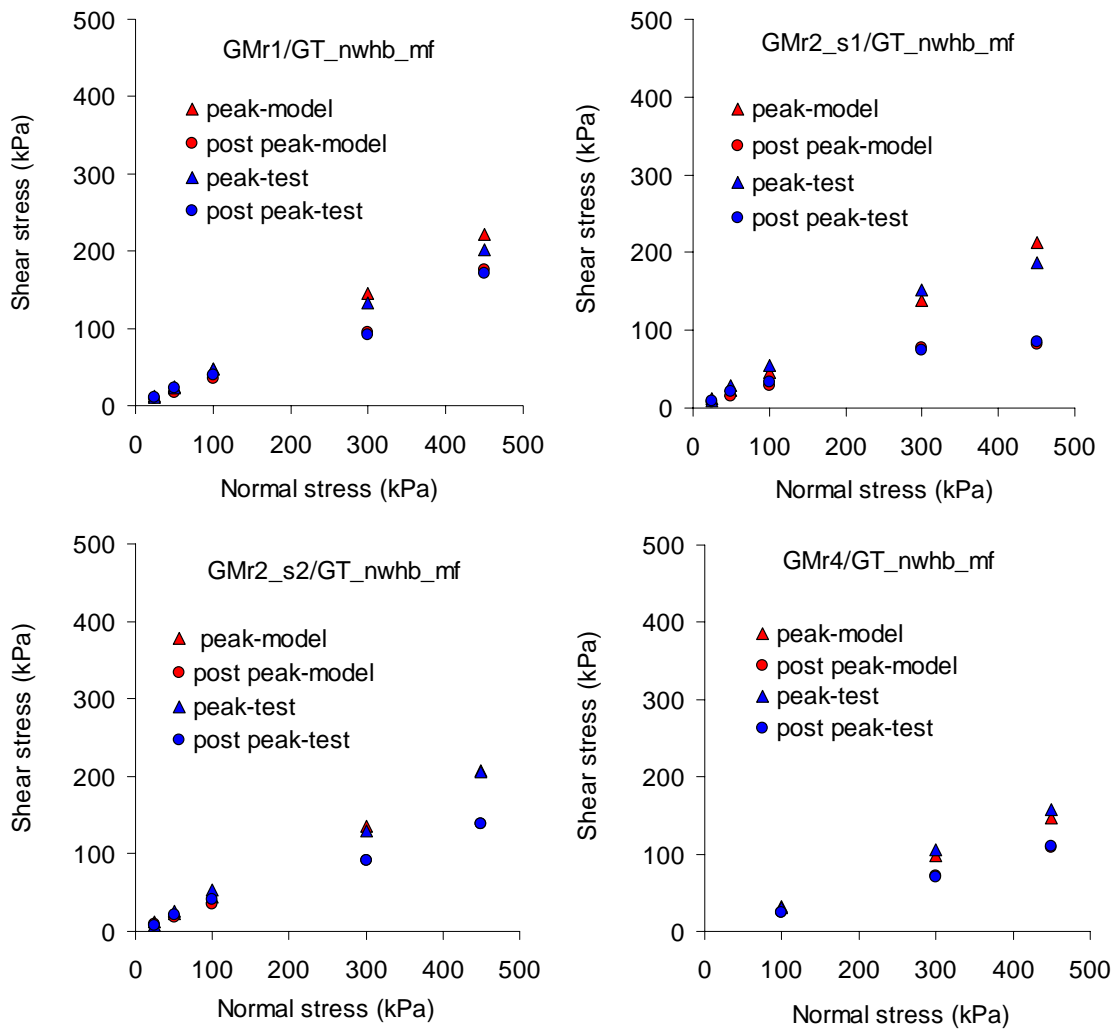


Figure 4 Comparison of peak and post-peak shear strength models with direct shear tests results of rough geomembranes/GT_nwhb_mf interfaces. The post-peak shear stress value corresponds to a horizontal displacement of 50 mm.

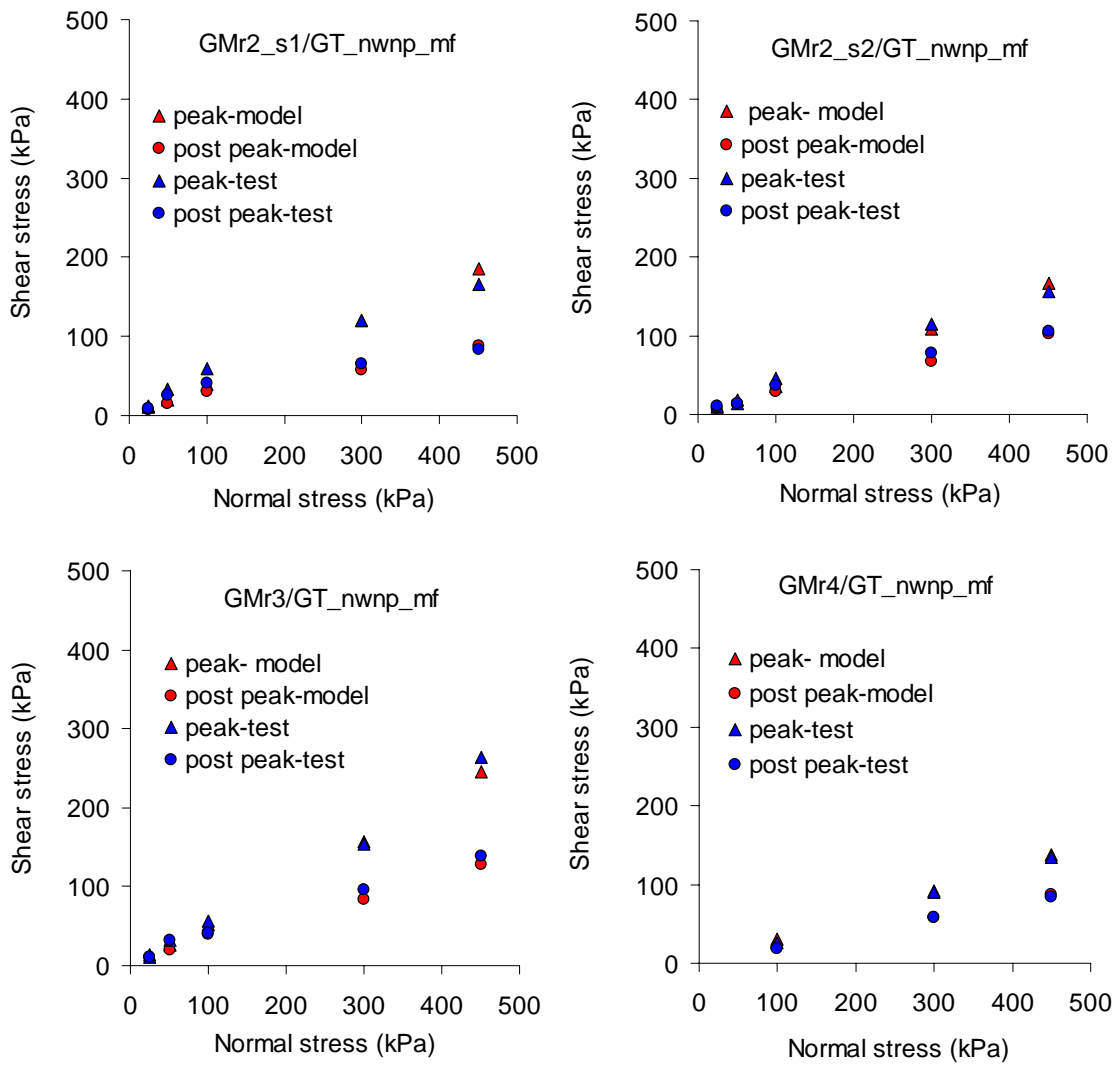


Figure 5 Comparison of peak shear strength models with peak shear stress from the direct shear tests of rough geomembranes/GT_nwnp_mf interfaces. The post-peak shear stress value corresponds to for a horizontal displacement of 50 mm.

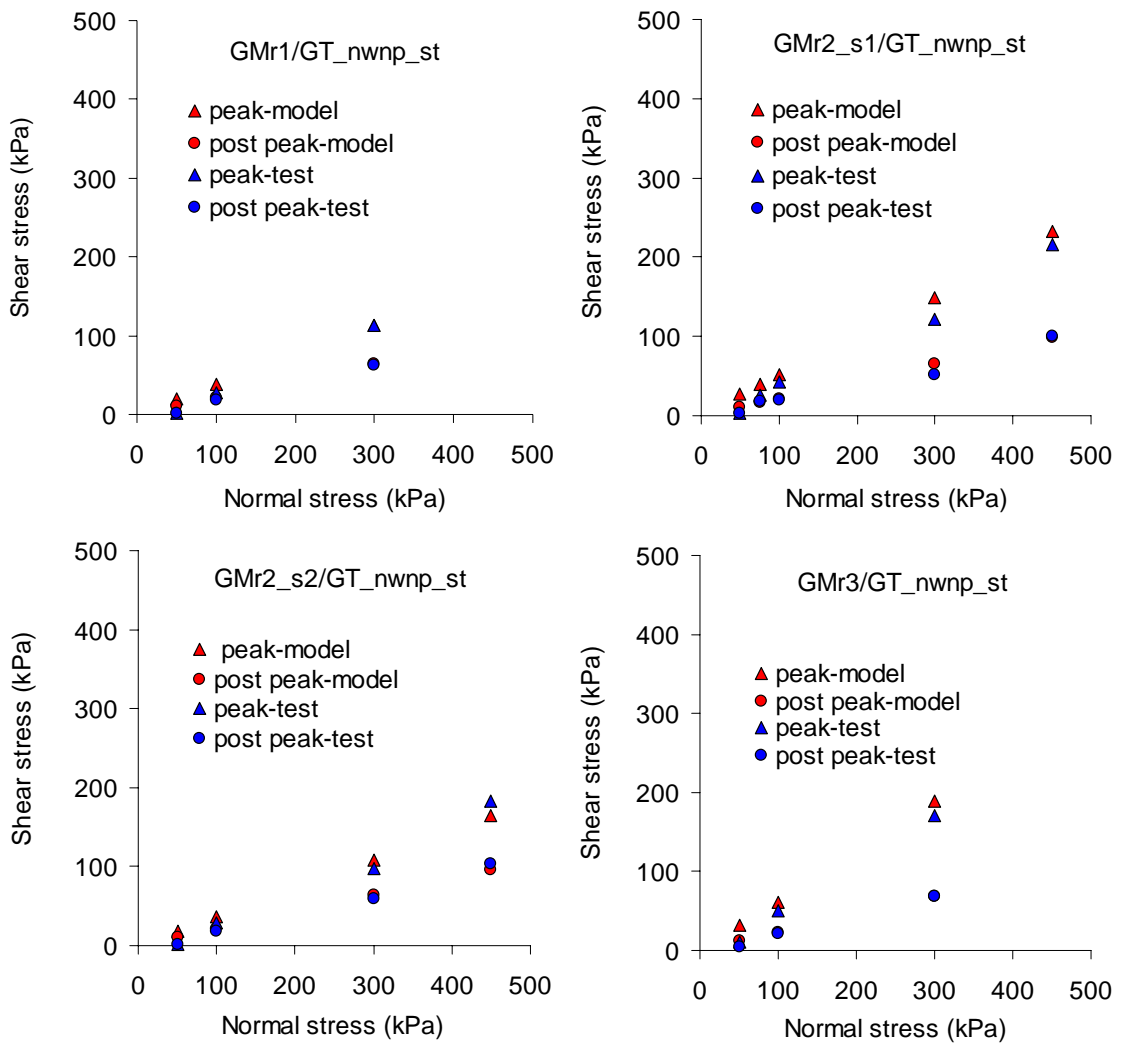


Figure 6 Comparison of peak shear strength models with peak shear stress from the direct shear tests of rough geomembranes/GT_nwnp_st interfaces. The post-peak shear stress value corresponds to for a horizontal displacement of 50 mm.

Apéndice F

Data file for direct shear test

Direct shear test

```

new
title
    Direct Shear test between geotextile and geomembrane
set large
def rate
    rate=(t1-t2)/500000.0
end
def time0
    t0=clock/100.0
end
def time1
    t1=clock/100.0
end
; Geometry parameters
def _para_geom
    _pp =0.0050
    len1 =0.300+_pp ; m
    wid1 =0.300+_pp
    hei g1=0.0015
    len2 =0.300+_pp+_pp
    wid2 =0.300+_pp+_pp
    hei g2=0.004
    _pp1 =_pp+0.00001
    _pp2 =_pp-0.00001
    ttt=1+hei g2
    tttpl us=ttt+hei g1
    _h1=hei g1+hei g2-0.0001
    _h2=hei g2+0.0001
    _h3=hei g2-0.0001
    _h4=hei g1+hei g2
    _hh1=ttt-0.00001
    _hh2=ttt+0.00001
    _l1=len2-0.00001
    _l2=len2+0.00001
    _w1=wid2-0.00001
    _w2=wid2+0.00001
    _l3=len1-0.00001
    _l4=len1+0.00001
    _w3=wid1-0.00001
    _w4=wid1+0.00001

```

```

end
 Para geom
; Peak displacement parameters
def Para_dpeak
    _a=4.6           ; fit constant
    _b=0.0161       ; fit constant

end
 Para_dpeak
def Para_kn
    _q=5e-8
    _r=1e-5

end
 Para_kn

; Shear stress parameters
def Para_shear
    _HL=6           ; HL: hook and loop parameter
    _gcs=1.5e7      ; maximum compression stress that gets the
                    ; minimum possible thickness of the geotextile in
                    ; Pa
    _rfri c=14      ; residual friction angle (degrees)
    _M=0.1621       ; interbedding fit factor
    _N=0.6556       ; interbedding fit factor

end
 Para_shear

; Test parameters
def Para_test
    _vel =1e-7      ; displacement/steps
    _ns=0.30e6      ; normal stress (Pa)
    _nss=-_ns
end
 Para_test

; Create Material Zones
gen zone brick p0 (_pp, _pp, ttt) p1 (len1, _pp, ttt) p2(_pp, wi d1, ttt) &
p3(_pp, _pp, tttpl us) p4(len1, wi d1, ttt) p5(_pp, wi d1, tttpl us) &
p6(len1, _pp, tttpl us) p7(len1, wi d1, tttpl us) size (10 10 5) group top

gen zone brick p0 (0, 0, 0) p1 (len2, 0, 0) p2 (0, wi d2, 0) &
p3 (0, 0, hei g2) p4(len2, wi d2, 0) p5(0, wi d2, hei g2) p6(len2, 0, hei g2) &
p7(len2, wi d2, hei g2) size (10 10 5) group bot
; Create interface

```

```

inter 1 face range z _hh1 _hh2
;inter 1 maxedge 15e-3

Ini    z add -1 range gro top
plot set eye a
plot set ma 1.5
plot set ce a
plot set rot 20 0 30
plot contour szz interface white axes black disp

; Assign properties
model elastic
prop bulk 2.1e9  sh 1.8e8  ra gr top
prop bulk 1.0e7  sh 1.5e7  ra gr bot
int 1 prop fric 70 kn 3.75e11 ks 3.75e11

; Assign boundary and initial conditions
fix x y z range z -0.00001 0.00001

apply nstress _nss range z _h1 100
ini szz _nss
time0

hist unbal
hist gp zdisp _pp _pp _h4
hist gp xvel  _pp _pp hei g2

step 0
plot contour szz interface white axes black disp
solve
save consol300_Naue.sav
call shear_stress_300_Naue.dat
time1
print rate

res consol300_Naue.sav

; Normal and shear stiffness of the interface
def _stif
  _ip=i_node_head(i_head)
  loop while _ip # null
    _value_kn=1000*(1/_q)*(1-(_ns/((1/_r)+_ns)))^(-2)
    _dpeak=(_b*( _ns/1000))+_a           ; peak displacement (mm)
    _i=( _N*log(_gcs/_ns))/(log(_gcs/_ns)-( _M*_HL))
    ; interbedding parameter

```

```

        _HLP=_HL*_i
        ;hook and loop and interbedding peak component
        _value_ks=10000*(1000/_dpeak)*_ns*tan((_HLP*log(_gcs/_ns)+_rfri
c)*degrad) ;shear stiffness Barton (Pa/m)
        in_prop(_ip, 'kn')=_value_kn
        in_prop(_ip, 'ks')=_value_ks
        _ip=in_next(_ip)
    end_loop
end

_stif

ini xdis 0.0 ydis 0.0 zdis 0.0
ini xvel 0 yvel 0 zvel 0
fix z y          range z _h1 100
ini xvel _vel    range group top
fix xvel        range group top

;Define shear stress parameters

def _coord
    _start=-(_rfri c/(_HLP*log(_gcs/_ns)))
    ;to calculate the start curve shear stress-shear displacement
    _ultimate=50/_dpeak
    ;to calculate post-peak curve shear stress-shear displacement
    _final=1000/_dpeak
    ;to calculate the final curve shear stress-shear displacement
end
_coord

;Dimensionless model for shear stress-displacement modelling.

table 1      0, _start      0.30, 0.0      0.6, 0.8      1.0, 1.0      1.3, 0.5
              2.0, 0.35     3.0, 0.3      4.0, 0.25     _ultimate, 0.24
              _final, 0.0
table 2      0, _start      0.25, 0.0     0.4, 0.4      0.6, 0.7      1.0, 1.0
              1.2, 1.0      2.0, 0.7      3.0, 0.5      _ultimate, 0.5
              _final, 0.0

;Shear stress average

def _fri c
    p_in=i_node_head(i_head)
    loop while p_in # null
        val sd=in_sdisp(p_in, 1)
        xcord = val sd*1000/_dpeak
    end
end

```

```
        if _ns > 0.1e6 then
            _HLM=table(1,xcord)
        else
            _HLM=table(2,xcord)
        end if
        _value_fric=(_HLM*_HLP*log(_gcs/_ns))+_rfric
        in_prop(p_in, 'fric')=_value_fric
        p_in=in_next(p_in)
    end loop
end
set fischcall 2 _fric
def sstav
    val ns=0.0
    val ss=0.0
    val sd=0.0
    count=0.0
    p_in=i_node_head(i_head)
    loop while p_in # null
        if in_ztarget(p_in) # null then
            val ns=val ns+in_nstr(p_in)*in_area(p_in)
            val ss=val ss+in_sstr(p_in,1)*in_area(p_in)
            val sd=val sd+in_sdisp(p_in,1)
            count=count+1.0
        end if
        p_in=in_next(p_in)
    end loop
    sstav = val ss/(0.3*0.3*1000)
    nstav = val ns/(0.3*0.3*1000)
    sjdisp = (val sd/count)*1000
end
his ns 5000
hist sstav nstav sjdisp
plot hist 4 vs 6
step 500000
save shear300_Naue.sav
hist write 6 vs 4 file 300_naue.his
ret
```
