



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE LA COLMATACIÓN A LARGO PLAZO DE GEOTEXTILES

Trabajo realizado por:

Javier González Fernández

Dirigido:

Elena Blanco Fernández

Jaime Carpio García

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, septiembre de 2019

TRABAJO FIN DE MASTER

Estudio de la Colmatación a Largo Plazo De Geotextiles

Trabajo Fin de Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, septiembre 2019

Autor: Javier González Fernández

Directores: Elena Blanco Fernández y Jaime Carpio García

Centro: ETSICCP de Santander (Universidad de Cantabria)

Palabras clave: geotextiles, suelos, colmatación, permeabilidad, laboratorio

Investigación desarrollada en el ámbito de los firmes permeables complementada por un trabajo de laboratorio de caracterización de los geotextiles y de los suelos empleados.

La finalidad es proporcionar una estimación de los valores de los coeficientes de reducción por colmatación de los geotextiles, en la aplicación de los firmes permeables, en superficies horizontales.

El núcleo del trabajo consistió en la medida de la variación de la permeabilidad por colmatación de los geotextiles tras una simulación de uso equivalente a 25 años de vida útil.

Se han realizado ensayos de permeabilidad de 175 probetas circulares, ensayos de espesor de 50 probetas circulares y 15 probetas circulares en los ensayos de abertura característica.

Se han utilizado 50 probetas cuadradas para los ensayos de masa por unidad de superficie y 50 probetas rectangulares en los ensayos de tracción.

Asimismo, se ha efectuado la granulometría de los suelos empleados y ensayos de plasticidad de la arcilla, lo que hace un total de 344 ensayos.

Desarrollado en el Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC), se ha aplicado la normativa UNE-EN ISO vigente.

REFERENCIAS FUNDAMENTALES

García Casuso, C. (Julio de 2015). *Trabajo Fin de Máster. Estudio de ahorros y geotextiles para firmes permeables.*

Koerner, R. M. (1998). *Designing with geosynthetics.* New Jersey: Prentice-Hall.

UNE EN ISO 11058 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga. (Julio de 2010).

Study of Long-Term Clogging of Geotextiles

End of Master's Degree in Civil Engineering, September 2019

Author: Javier González Fernández

Directors: Elena Blanco Fernández y Jaime Carpio García

Center: ETSICCP de Santander (University of Cantabria)

Keywords: geotextiles, soils, clogging, permeability, laboratory

Research developed in the field of permeable pavements complemented by a laboratory work characterizing the geotextiles and the soils used.

The purpose is to provide an estimate of the values of the reduction coefficients due to clogging of geotextiles, in the application of permeable pavements, on horizontal surfaces.

The core of the work consisted of measuring the variation in permeability due to clogging of geotextiles after a simulation of use equivalent to 25 years of useful life.

Permeability tests of 175 circular specimens, thickness tests of 50 circular specimens and 15 circular specimens have been performed in the characteristic aperture tests.

50 square specimens have been used for mass tests per unit area and 50 rectangular specimens in tensile tests.

Likewise, the granulometry of the soils used and clay plasticity tests have been carried out, which makes a total of 344 tests.

Developed in the Geosynthetics Laboratory of the University of Cantabria (LAGUC), the current UNE-EN ISO regulations have been applied.

MAIN REFERENCES

García Casuso, C. (Julio de 2015). *Trabajo Fin de Máster. Estudio de ahorras y geotextiles para firmes permeables.*

Koerner, R. M. (1998). *Designing with geosynthetics.* New Jersey: Prentice-Hall.

UNE EN ISO 11058 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga. (Julio de 2010).

Tabla de contenido

Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Aspectos previos	8
1.1.1 Aspectos normativos.....	8
1.1.2 Funciones de los geotextiles	8
2. OBJETIVO DEL TRABAJO	9
3. ESTADO DEL ARTE.....	10
3.1 Definición de geotextil	10
3.2 Clasificación de suelos en función de la granulometría	10
3.3 Clasificación de suelos en función de su composición.....	13
3.4 Clasificación de suelos por su plasticidad	13
3.5 Colmatación	14
3.5.1 Definición de colmatación.....	14
3.5.2 Antecedentes. Normas de colmatación existentes.....	15
3.5.3 Colmatación física o por partículas	15
3.5.4 Colmatación química.....	16
3.5.5 Colmatación biológica	16
3.6 Diseño de geosintéticos para filtración y separación (diseño por función).....	16
3.7 Diseño para filtración	16
3.8 Diseño para separación	16
3.9 Definición de los coeficientes de reducción por colmatación	16
3.10 Orden de magnitud de los coeficientes de reducción por colmatación	17

4. METODOLOGÍA	18
4.1 Descripción de LAGUC y de los equipos de ensayo utilizados	18
4.2 CARACTERIZACIÓN DE GEOTEXTILES	18
4.2.1 Abertura característica	19
4.2.3 Permeabilidad al agua perpendicular al plano sin carga	20
4.2.4 Tracción	20
4.2.5 Espesor de capas individuales	21
4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	21
4.3.1 Granulometría	21
4.3.2 Índice de plasticidad (límite líquido y límite plástico)	22
4.3.3 Estandarización o normalización de suelos.....	23
4.4 DESCRIPCIÓN PROPUESTA DE MÉTODO DE ENSAYO	23
4.4.1 Descripción de los tipos de suelos normalizados y procedimiento necesario para fabricarlos.....	23
4.4.2 Definición y descripción del ensayo de colmatación	24
.....	26
.....	26
4.4.3 Selección de geotextiles sobre los que se realizarán los ensayos.....	27
4.4.4 Selección de suelos sobre los que se realizará el ensayo.....	29
4.4.5 Medición de caudales, datos básicos y organización de ensayos de colmatación	31
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.1 Resultados de los ensayos de caracterización del suelo arcilloso	34
5.2 Resultados de los ensayos de tracción de geotextiles	34
5.3 Resultados de los ensayos de abertura característica de geotextiles	35
5.4 Resultados de los ensayos de masa por unidad de superficie y espesor	35
5.5 Resultados de los ensayos de permeabilidad de geotextiles.....	36
5.6 Resultados de valores de coeficientes de reducción de permeabilidad por colmatación obtenidos en el trabajo.	37

5.7 Discusión	40
6. CONCLUSIONES	47
6.1 Conclusiones generales	47
6.2 Futuras líneas de investigación	48
Referencias	49

Índice de Figuras

Figura 3-1: Rectas que definen la carta de Casagrande.	13
Figura 3-2: Carta de plasticidad de Casagrande (Fuente, Geotecnia I .Propiedades del terreno. Primera edición).....	13
Figura 3-3: Clasificación de suelo para condiciones de flujo estático. (Fuente, Guía MIRAFI) ...	14
Figura 4-1: Balanzas empleadas en la determinación de la masa por unidad de superficie.....	18
Figura 4-2: Máquina de ensayos universal estática.....	18
Figura 4 3: Ensayo de abertura característica. Filtración del líquido que pasa.....	19
Figura 4-4: Ensayo de espesor de capas individuales. Procedimiento B (Carga incremental de probetas individuales).....	21
Figura 4-5: Ensayo de espesor de capas individuales. Probeta colocada entre placa de referencia y pie de presión.....	21
Figura 4-6: Cuchara de Casagrande.....	22
Figura 4-7: Tamizadora empleada en el análisis granulométrico del árido calizo.....	22
Figura 4-8: Montaje para ensayo de colmatación. Parte superior.....	24
Figura 4-9: Montaje para ensayo de colmatación. Parte inferior.....	24
Figura 4-10: Geotextil base.....	25
Figura 4-11: Capa de grava.....	25
Figura 4-12: Filler calizo empleado en la colmatación.....	26
Figura 4-13: Hidrocarburos empleados en la colmatación.....	26
Figura 4-14: Norma UNE-EN ISO 11058 (2010). Esquema de aparato de ensayo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga, de flujo vertical.....	26
Figura 4-15: Aparato de ensayo en laboratorio de permeabilidad al agua perpendicular al plano sin carga, de flujo vertical.....	27
Figura 4-16. Geotextil no tejido blanco 100 g/m2 (EXP19008-1).....	27
Figura 4-17. Geotextil tejido negro-tela cobertura solo PP 100g/m2 (EXP19008-2).....	27

Figura 4-18. Geotextil no tejido blanco 200 g/m ² (EXP19008-3).....	28
Figura 4-19. Geotextil no tejido blanco 300 g/m ² (EXP19008-4).....	28
Figura 4-20. Geotextil no tejido termosoldado verde 100 g/m ² (EXP19008-5).....	28
Figura 4-21: Curva granulométrica del suelo seleccionado.....	29
Figura 4-22 Curva granulométrica del suelo tolerable.....	30
Figura 4-23: Suelo tolerable.....	30
Figura 4-24: Suelo seleccionado.....	30
Figura 4-25: Probeta de 1 L y cronómetro de 0,01 s de precisión utilizados en la medición de los caudales.....	32
Figura 5-1: Valores de permeabilidad característicos de los geotextiles.....	36
Figura 5-2: Comparación de los coeficientes de reducción de permeabilidad por colmatación obtenidos para cada geotextil según la clasificación de los suelos.....	40
Figura 5-3: Comparación de valores del coeficiente de reducción para cada geotextil en las escorrentías en ausencia de suelo, según los contaminantes.....	41
Figura 5-4: Comparación de valores de coeficientes de reducción de permeabilidad por colmatación para cada geotextil según la clasificación de los suelos y sometido a escorrentía con todos los contaminantes.....	41
Figura 5-5: Relación entre abertura característica y permeabilidad.....	43
Figura 5-6: Relación entre espesor y pérdida de permeabilidad.....	43
Figura 5-7: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.....	44
Figura 5-8: Relación entre espesor y pérdida de permeabilidad.....	44
Figura 5-9: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.....	45
Figura 5-10: Relación entre abertura característica y pérdida de permeabilidad.....	45
Figura 5-11: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.....	46
Figura 5-12: Relación entre espesor y pérdida de permeabilidad.....	46
Figura 5-13: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.....	47

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS). Fuente: Geotecnia I. Propiedades del terreno. Primera edición.....	12
Tabla 4-4-1: Norma ASTM D5141. Granulometría de la muestra de suelo	23
Tabla 4-4-2: Norma ASTM D7351. Granulometría e índice de plasticidad de la muestra de suelo.	24
Tabla 4-4-3: Límites de Atterberg de la arcilla.....	30
Tabla 4-4-4: Identificación de geotextiles.....	31
Tabla 4-4-5: Escenarios de colmatación desarrollados en laboratorio.....	32
Tabla 4-4-6: Conjunto de ensayos de colmatación desarrollados en laboratorio.....	33
Tabla 5-5-1: Resultados obtenidos en ensayo de límite líquido.	34
Tabla 5-5-2: Resultados obtenidos en ensayos de resistencia a la tracción.	34
Tabla 5-5-3: Propiedades físicas de los geotextiles.....	35
Tabla 5-5-4: Propiedades físicas de los geotextiles.....	35
Tabla 5-5-5: Valores del coeficiente de reducción de permeabilidad por colmatación obtenidos.	39
Tabla 6-1: Rangos de valores del coeficiente de reducción obtenidos.....	48
Tabla 6-2: Rangos de valores del coeficiente de reducción obtenidos.....	48
Tabla 6-3: Rangos de valores del coeficiente de reducción obtenidos.....	48

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos previos

Este es un trabajo fin de máster con la cualidad de ser un trabajo de investigación, que se desarrolló con el asesoramiento y supervisión continua de sus directores.

Este trabajo refleja las investigaciones realizadas, sus procedimientos y sus resultados y contiene el soporte teórico que las regula así como indica las posibles utilidades.

1.1.1 Aspectos normativos

“El TFM consistirá en la realización por parte del estudiante de un trabajo original, autónomo y personal, bajo la dirección de un profesor en el que se apliquen y desarrollen los conocimientos, capacidades y competencias adquiridas a lo largo de la titulación.

El TFM atenderá a una de las siguientes tipologías: proyecto constructivo clásico, proyecto básico y estudio o trabajo sobre cualquier aspecto de la ingeniería civil.

El estudio puede abarcar cualquier campo de la ingeniería civil y tratarse de un cálculo detallado, una comparación de procedimientos constructivos, un estudio de alternativas, un desarrollo de ensayos de laboratorio, un desarrollo de modelos numéricos, etc... En este apartado se incluyen los trabajos relacionados con desarrollo de software y los trabajos de investigación.”

1.1.2 Funciones de los geotextiles

Los geotextiles son ampliamente utilizados en aplicaciones como carreteras, drenaje, obras hidráulicas u obras geotécnicas.

1.1.2.1 Filtración

El geotextil permite el paso de agua pero evita la migración de partículas de suelo.

1.1.2.2 Separación

El geotextil evita la mezcla de capas de suelo con distintas distribuciones granulométricas.

1.1.2.3 Drenaje

El geotextil capta agua y lo conduce en su mismo plano.

1.1.2.4 Refuerzo

El geotextil sirve para aumentar la resistencia del terreno.

1.1.2.5 Barrera de contención de fluidos/gases

El geotextil actúa como barrera impermeable.

1.1.2.6 Control de la erosión

El geotextil reduce la erosión del suelo causada por la precipitación y la escorrentía superficial.

2. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo inicial del trabajo surgió de la necesidad de establecer unos coeficientes de colmatación o de reducción por colmatación más afinados o precisos de los geotextiles colocados en obra civil.

El transcurso del trabajo de laboratorio fue conduciendo hacia la creación de una nueva casuística enfocada en aplicaciones de permeabilidad en firmes permeables, dentro del campo del control en origen de la escorrentía superficial, para la que se dieron unos coeficientes de merma por colmatación que no están establecidos, porque los existentes actualmente (Koerner, 1998) no contemplan la aplicación de firmes permeables. Se busca abrir una nueva vía en esta línea de investigación tan poco estudiada.

Uno de los problemas en que podemos pensar es su colmatación debido al barro mezclado con agua procedente de los taludes y otras fuentes diversas. Si bien es prácticamente imposible agotar su capacidad totalmente, usualmente nos encontraremos con geotextiles colmatados parcialmente. Es por ello que hay diversos criterios de colmatación.

En este trabajo se va a comparar la permeabilidad de los geotextiles en su estado inicial con la del estado de colmatación, obteniendo así el coeficiente de reducción, que nos servirá para el diseño. Se dividirá por este coeficiente al valor de la permeabilidad proporcionado por el fabricante, quedando abierto a la aplicación de factores de seguridad.

Como paso previo al comienzo del trabajo de laboratorio se realiza una tarea de investigación consistente en una búsqueda de un criterio de colmatación en la normativa existente, aunque se prevé que no existe.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Definición de geotextil

La norma UNE-EN ISO 10318-1:2015 se refiere a geosintético (GSY) como: término genérico para describir un producto, de cuyos componentes, al menos uno de ellos, está fabricado con un polímero sintético o natural en forma de una lámina, tira o banda o estructura tridimensional, que se emplea en contacto con suelos y/u otros materiales en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil.

Asimismo la norma UNE-EN ISO 10318-1:2015 se refiere a geotextil (GTX) como: material textil plano, permeable, polimérico (sintético o natural), que puede ser no tejido, tejido o tricotado, que se emplea en contacto con suelos y/u otros materiales en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil.

En otras palabras, los geotextiles son un tipo de geosintéticos. Sus principales aplicaciones se encuentran en los firmes permeables y en el drenaje longitudinal de carreteras, como filtro y como elemento separador de materiales. También se emplean en líneas de ferrocarril. Los geosintéticos como define la norma ASTM D5141, son un producto plano fabricado con materiales poliméricos.

3.2 Clasificación de suelos en función de la granulometría

La curva granulométrica nos proporciona el porcentaje de suelo que pasa por cada tamiz y el retenido. Además nos proporciona el tamaño máximo de árido y otros tamaños característicos empleados en la determinación de coeficientes comúnmente utilizados como el coeficiente de uniformidad. Un sistema normalizado es el USCS, sistema unificado de clasificación de suelos, cuya nomenclatura está formada por un conjunto de dos letras y también puede ser doble separadas éstas por un guion, como se muestra en la Tabla 3-1. Esta clasificación indica la cantidad relativa de grava, arena, limo y arcilla del suelo.

DIVISIONES PRINCIPALES		SÍMBOLOS DEL GRUPO	DENOMINACIÓN TÍPICA	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN			
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50% es retenido en el tamiz nº 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido por	GRAVAS LIMPIAS	GW	Gravas y mezclas grava-arena bien graduadas, con pocos fino o sin finos	Clasificación basada en el porcentaje de finos que pasan por el tamiz nº 200 (0,080 UNE) Menos del 5%: GW, GP, SW, SP Más del 12%: GM, GC, SM, SC Del 5 al 12%: Casos intermedios que requieren el uso de doble símbolo	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = D_{30}^2/(D_{60} * D_{10})$ entre 1 y 3	
			GP	Gravas y mezclas grava-arena mal graduadas, con pocos finos o sin finos			Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para GW
		GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo		Debajo de la línea A o $IP < 4$	Los casos intermedios requieren doble símbolo
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla		Por encima de la línea A o $IP > 7$	
		ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el	ARENAS LIMPIAS	SW		Arenas y arenas con grava bien graduadas, con pocos finos o sin finos	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = D_{30}^2/(D_{60} * D_{10})$ entre 1 y 3
				SP		Arenas y arenas con grava mal graduadas, con pocos finos o sin finos	
	ARENAS CON FINOS		SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Debajo de la línea A o $IP < 4$	Los casos intermedios requieren doble símbolo	
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	Por encima de la línea A o $IP > 7$		

SUELOS DE GRANO FINO 50% o más pasa por el tamiz nº 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido igual o menor que 50	ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas	
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas	
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos con mico o diatomeas, limos elásticos	
		CH	Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad	
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media o elevada	
SUELOS DE ESTRUCTURA ORGÁNICA	DE	PT	Turbas, fangos y otros suelos de alto contenido orgánico	Fácilmente identificables por la presencia de raíces, hojas y materia vegetal fibrosa en descomposición, así como su color marrón oscuro o negro, su olor y su tacto suave y esponjoso

Tabla 3-1: Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS). Fuente: Geotecnia I. Propiedades del terreno. Primera edición.

3.3 Clasificación de suelos en función de su composición

Clasificación basada en la naturaleza de los áridos: ofíticos, silíceos, calizos, etc.

3.4 Clasificación de suelos por su plasticidad

La carta de Casagrande da lugar a esta clasificación. Está formada por las siguientes dos rectas.

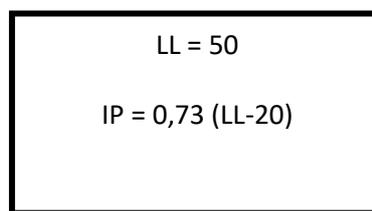


Figura 3-1: Rectas que definen la carta de Casagrande.

En el eje de ordenadas se representa el índice de plasticidad y en el eje de abscisas el límite líquido como se observa en la Figura 3-2. Por lo tanto, es necesario obtener los límites de Atterberg.

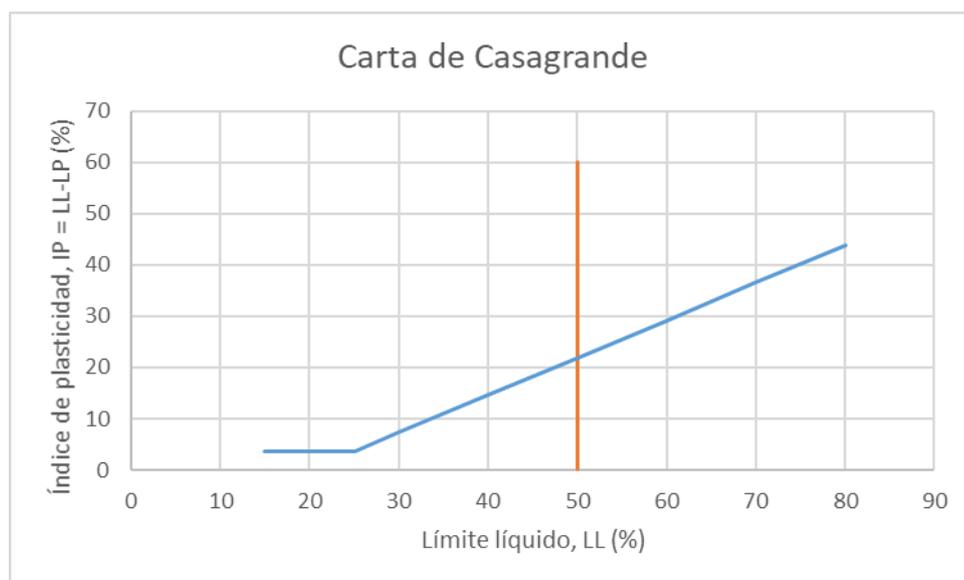


Figura 3-2: Carta de plasticidad de Casagrande (Fuente, Geotecnia I. Propiedades del terreno. Primera edición)

El esquema de la Figura 3-3 recoge una clasificación de suelos basada en su granulometría y en su índice de plasticidad.

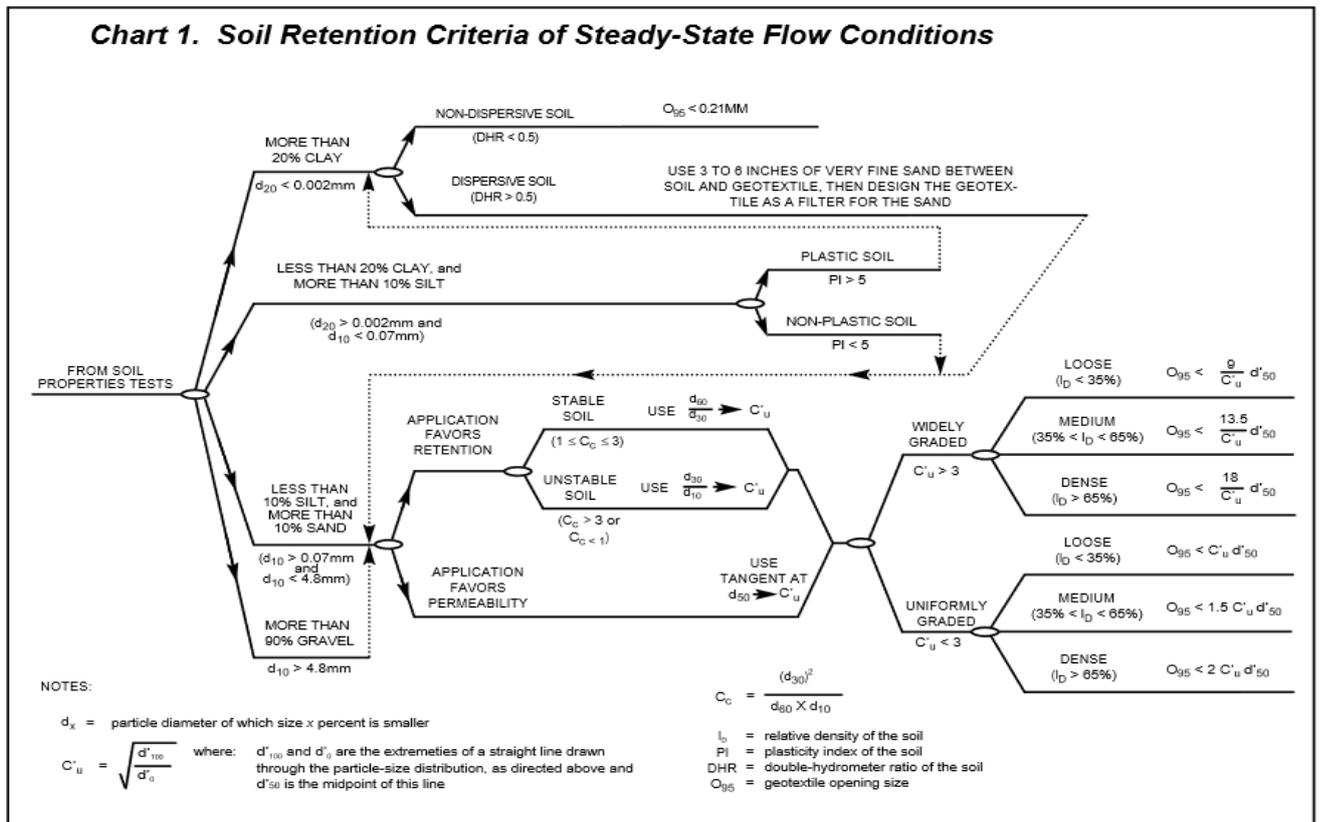


Figura 3-3: Clasificación de suelo para condiciones de flujo estático. (Fuente, Guía MIRAFI)

3.5 Colmatación

Los tres tipos de colmatación son física, química y biológica. En los siguientes subapartados definen todas ellas, aunque nos centraremos en las dos primeras. La principal razón por la que el geotextil se colmata es por el transporte de partículas de suelo provocado por la escorrentía.

3.5.1 Definición de colmatación

La norma D5101 define la colmatación en geotextiles como la tendencia de un geotextil dado a perder permeabilidad debido a partículas de suelo que se han incrustado en las aberturas de la tela o se han acumulado en la superficie del geotextil para formar una capa con menor permeabilidad que la de la muestra de suelo a granel.

3.5.1.1 Métodos existentes para estudiar la colmatación y justificación de la solución adoptada

De entre los métodos existentes en la normativa uno de ellos no es adecuado por referirse al corto plazo mientras que el resto no es factible en estos momentos desarrollarlo en el laboratorio. Además el primero es un ensayo parecido al de abertura característica, en el cual

se tiene en cuenta el suelo que pasa, mientras que en este caso consideramos la colmatación del geotextil desde el punto de vista de la permeabilidad.

También se encontró un método (Miskowska, Lenart, & Koda, 2017), pero no puede implementarse en este laboratorio actualmente.

Por lo tanto se decide recurrir a métodos ya probados en este laboratorio.

3.5.2 Antecedentes. Normas de colmatación existentes

ASTM D5141, "Standard Test Method for Determining Filtering Efficiency and Flow Rate of the Filtration Component of a Sediment Retention Device". Los resultados se muestran como un porcentaje de eficiencia de filtración y las siguientes unidades ($m^3/m^2/min$), es posible trabajar con unidades del Sistema Internacional. Como recoge el resumen del método de ensayo, un componente de filtración se coloca verticalmente a través de un conducto o sobre una abertura vertical al final de un conducto. El tiempo que el agua fluye a través del componente de filtración y la cantidad de suelo que pasa son medidos. Los resultados dependerán del suelo específico evaluado.

ASTM D7351, "Standard Test Method for Determination of Sediment Retention Device Effectiveness in Sheet Flow Applications". Este método de ensayo establece las guías, requerimientos y procedimientos para evaluar la capacidad de los sistemas de retención de sedimentos (SRDs) de retener sedimentos cuando están expuestos a flujos laminares de agua cargada con sedimentos. También utiliza unidades del Sistema Internacional.

3.5.3 Colmatación física o por partículas

Consiste en la obstrucción de los huecos del geotextil por partículas de los suelos con los que está en contacto. En un firme permeable diversas sustancias líquidas o sólidas penetrarán a través del geotextil. Podrán hacerlo ellas solas o arrastradas junto con la escorrentía superficial debida a un aguacero o en el caso de los sólidos por el viento además de mezclados con líquidos. Esta corriente interna por el firme de líquidos distintos al agua, mezclados con agua y sólidos, puede dar lugar a lo que se conoce como colmatación (pérdida de permeabilidad del geotextil). Entonces, el geotextil tiene que ser capaz de permitir el paso del agua o del líquido sin que se produzca la migración de partículas.

3.5.4 Colmatación química

Consiste en la obstrucción de los huecos del geotextil por la cristalización de sales. En el caso de la escorrentía con hidrocarburos, aunque no haya reacción química, se produce una interacción química del hidrocarburo con el agua dado su carácter hidrófugo.

3.5.5 Colmatación biológica

Microorganismos tales como bacterias u hongos pueden degradar los polímeros. Este problema no reside tanto en las resinas como en los aditivos de los polímeros.

3.6 Diseño de geosintéticos para filtración y separación (diseño por función)

El diseño por función consiste en, una vez conocida la función principal del geotextil, calcular el valor numérico requerido de una determinada propiedad para esa función. Dividiendo este valor entre el valor admisible de la propiedad del geotextil propuesto, se obtiene un coeficiente de seguridad. Si éste es suficientemente mayor que 1.0, el geotextil propuesto es aceptable.

3.7 Diseño para filtración

La filtración se resume en dos requerimientos aparentemente conflictivos.

El filtro debe retener el suelo, lo que implica que la abertura de sus poros debe ser menor que un valor máximo. A su vez, el filtro debe ser suficientemente permeable para permitir un flujo libre relativo a través de él, lo que implica que la abertura de los poros del filtro y el número de éstos, debería ser mayor que un valor mínimo especificado. (Geotextile filter design, application and product selection guide)

3.8 Diseño para separación

La colocación de un geotextil trata de evitar que los finos ocupen los huecos entre los áridos arruinando su capacidad de drenaje así como que el suelo fino penetre en los áridos afectando a su resistencia.

3.9 Definición de los coeficientes de reducción por colmatación

Como hemos indicado anteriormente la colmatación del geotextil produce una afección a la permeabilidad. Los geotextiles pueden llevarse a la colmatación en el laboratorio y ser a continuación ensayados para medir su permeabilidad. Esta fracción de la permeabilidad inicial en condiciones previas a la colmatación dividida entre la inicial nos proporciona el coeficiente de reducción por colmatación que como ya hemos dicho nos servirá para el diseño.

3.10 Orden de magnitud de los coeficientes de reducción por colmatación

Los coeficientes de reducción presentan una gran variabilidad para un mismo geotextil según sean las condiciones de la colmatación y el tipo de suelo. Ya hemos dicho que alcanzar la colmatación total es muy difícil y normalmente encontraremos geotextiles colmatados parcialmente. Los rangos entre los que se encuentran son 2 a 10, 1 a 5, etc. (Koerner, 1998, pág. 151)

El origen de estas diferencias es diverso. No es lo mismo una escorrentía continua o en bloques, su duración, el tiempo y método de secado, etc. Que se definirá más adelante en la descripción del método de ensayo de colmatación.

Debido a esta gran variabilidad de los coeficientes de reducción es necesario más trabajo de laboratorio para obtener coeficientes de reducción en las distintas casuísticas.

4. METODOLOGÍA

4.1 Descripción de LAGUC y de los equipos de ensayo utilizados

Los ensayos de caracterización de geotextiles así como los de colmatación se desarrollaron en el Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria, impulsor de este trabajo, mientras que los de caracterización de suelos se llevaron a cabo con la colaboración del Grupo de Caminos. LAGUC es un laboratorio acreditado por ENAC. Los equipos empleados fueron calibrados previamente.

Tanto para el ensayo de tracción como para el de espesor de los geotextiles se empleó una máquina universal de ensayos de tipo estática Zwick/Roell Z100.

El ensayo de permeabilidad se llevó a cabo mediante un prototipo de equipos nucleares.

La abertura característica se determinó a través de un aparato Retsch AS 200.

Asimismo, para la obtención de la masa por unidad de superficie se contó con las siguientes dos balanzas, Sartorius Extend y gran Serie SV, que se muestran en la figura.



Figura 4-1: Balanzas empleadas en la determinación de la masa por unidad de superficie.



Figura 4-2: Máquina de ensayos universal estática.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE GEOTEXTILES

Se exponen las características que van a definir los geotextiles empleados. Cabe la posibilidad de realizar caracterizaciones de los geotextiles tanto antes de la colmatación como después, aunque se optó por realizar una caracterización previa para proporcionar información sobre los geotextiles a ensayar.

4.2.1 Abertura característica

El ensayo necesario para obtener la apertura característica de los geotextiles es el definido en la norma UNE-EN ISO 12956. Se realiza mediante lo que se llama un aparato de tamizado y consiste en colocar una probeta de geotextil y sobre ella material granular. Seguidamente se pulveriza agua, se pone en marcha el aparato de tamizado y se recoge el material que pasa por las aberturas del geotextil. Al final de un tiempo de tamizado correspondiente a 600 s, se apaga el aparato de tamizado y se cierra la alimentación de agua. La probeta se recoge junto con el material granular retenido. Se secan por separado el material granular que ha pasado y la probeta con el material granular retenido. Por último se determina la distribución



Figura 4-3: Ensayo de apertura característica. Filtración del líquido que pasa.

granulométrica del material granular y se calcula O_{90} que es la llamada apertura característica y que es igual a d_{90} . La letra “o” hace referencia al tamaño de apertura del geotextil y la letra “d” al tamaño de partícula del suelo.

4.2.2 Masa por unidad de superficie

La norma necesaria es la UNE-EN ISO 9864. La masa por unidad de superficie se calcula mediante el pesado de probetas cuadradas o circulares de dimensiones conocidas cortadas en diferentes posiciones y distribuidas por toda la longitud y anchura de la muestra. Se cortan no menos de diez probetas de un tamaño nominal de 100 cm² utilizando un troquel. La probeta se pesa con una exactitud de 10 mg.

4.2.3 Permeabilidad al agua perpendicular al plano sin carga

Se obtiene a través del ensayo definido en la norma UNE-EN ISO 11058. Consiste básicamente en hacer pasar un flujo de agua a través del geotextil y medir el volumen que pasa en un determinado tiempo. Se coloca una probeta circular de 55 mm de diámetro, se comprueba que el tiempo de equilibrio es inferior a cinco minutos y se comprueba la temperatura del agua y el oxígeno disuelto. A continuación se realiza la medición. Un transductor de presión mide la altura en cada instante, obteniendo una función $H(t)$, su derivada es la función $v(t)$.

4.2.4 Tracción

La norma necesaria es la UNE-EN ISO 10319. Esta norma internacional describe un método de ensayo de referencia para la determinación de las propiedades en tracción de los geosintéticos (de base polimérica de vidrio o metálica) por medio de una tira ancha. Esta norma internacional es aplicable a la mayor parte de los geosintéticos, incluyendo los geotextiles tejidos, los no tejidos, los geocompuestos, los geotextiles tricotados, georedes, geomantas y productos metálicos. También es aplicable a las geomallas y a geotextiles de estructura abierta similar, aunque puede ser necesario modificar las dimensiones de la probeta. No es aplicable a las barreras geosintéticas poliméricas o bituminosas, mientras que sí es aplicable a barreras geosintéticas de arcilla.

Esta norma internacional especifica un método de ensayo por tracción que cubre la medición de las características de fuerza y deformación e incluye procedimientos para el cálculo del módulo secante, de la fuerza máxima por unidad de anchura y de la deformación para la fuerza máxima. Se hace igualmente una mención sobre los puntos singulares en la curva fuerza/deformación.

Esta norma internacional también incluye procedimientos de medición de las propiedades en tracción de probetas acondicionadas y probetas mojadas.

4.2.5 Espesor de capas individuales

Se ha seguido el procedimiento B (carga incremental de probetas individuales). La norma UNE-EN ISO 9863-1:2017 define el espesor como la distancia entre una placa de referencia sobre la que se apoya la probeta y la cara de contacto de un pie de presión paralelo, que aplica una determinada presión sobre la probeta, o distancia entre dos puntos de referencia que aplican una presión dada sobre la probeta.



Figura 4-4: Ensayo de espesor de capas individuales. Procedimiento B (Carga incremental de probetas individuales).

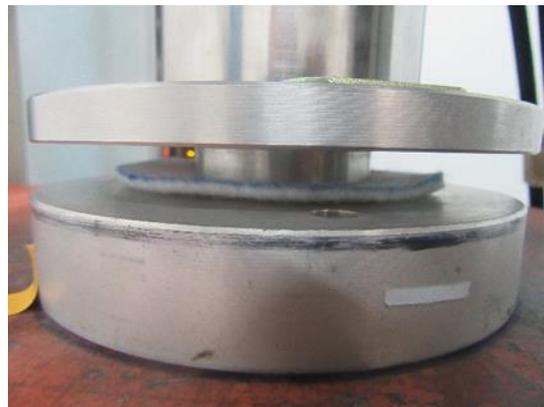


Figura 4-5: Ensayo de espesor de capas individuales. Probeta colocada entre placa de referencia y pie de presión.

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

El suelo granular se caracteriza fundamentalmente por su granulometría mientras que para el suelo cohesivo se requirió además realizar los ensayos de límite líquido y límite plástico.

4.3.1 Granulometría

En un suelo cualquiera, habrá en general partículas de todos los tamaños (grava, arena, limo y arcilla). La granulometría indica la proporción relativa de cada una de estas fracciones.

Se representa por la curva granulométrica, que indica, para cada diámetro de partícula D , el porcentaje en peso de partículas menores que D . Se representa en escala logarítmica de tamaños.

Una curva muy tendida indica una graduación continua de tamaños de partículas, mientras que una caída vertical brusca para un cierto diámetro quiere decir que existe una gran cantidad de partículas de dicho diámetro.

Para las fracciones gruesas (tamaños de grava y arena), la granulometría se determina mediante el ensayo de tamizado (norma UNE-103101). Se hace pasar el suelo por una serie de tamices de finura creciente, y se pesa la parte retenida en cada uno de ellos. El tamiz más fino que suele usarse es el 0,080 UNE (0,080 mm), o el aproximadamente equivalente nº 200 ASTM (0,074 mm). Este tamiz corresponde precisamente a la separación entre arenas y limos.

Para los tamaños inferiores a éstos, es decir, para la fracción limosa, se hace el ensayo de sedimentación.

4.3.2 Índice de plasticidad (límite líquido y límite plástico)

El límite plástico (LP) es la humedad para la cual el suelo pasa de ser un sólido frágil a plástico, es decir, que puede moldearse sin agrietarse. Se determina mediante ensayo normalizado (Norma UNE-103104). Se amasa la arcilla entre la palma de la mano y una superficie lisa, formando un pequeño cilindro hasta la aparición de grietas. Cuando el agrietamiento comienza a producirse para un diámetro del cilindro de arcilla de unos 3 mm, se dice que la arcilla tiene la humedad correspondiente al límite plástico.

El límite líquido (LL) es la humedad para la cual el suelo pasa de ser un sólido plástico a un líquido viscoso. Se determina mediante ensayo normalizado (Norma UNE-103103) con la cuchara de Casagrande, que se muestra en la Figura 5-1. En él se amasan unos 100 g de suelo con la humedad aproximada del límite líquido, y se rellena con él la parte inferior del cuenco metálico (cuchara). Luego se hace un surco con un acanalador normalizado y se dan golpes a la cuchara dejándola caer sobre la base desde una altura determinada (para esto el aparato lleva un mecanismo regulador). Se dice que la arcilla tiene la humedad del límite líquido cuando, tras dar 25 golpes, el surco se cierra en una longitud aproximada de 12 mm (media pulgada).



Figura 4-6: Cuchara de Casagrande.



Figura 4-7: Tamizadora empleada en el análisis granulométrico del árido calizo.

Las definiciones anteriores de los límites son un tanto arbitrarias, y no responden a un cambio brusco en la consistencia del suelo. Tienen sin embargo la virtud de ser utilizadas de forma universal, lo que permite validar descripciones de suelo hechas por personas diferentes en lugares distintos del mundo.

El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre las humedades de los límites líquido y plástico. Indica el tamaño del rango de humedades en el que el suelo se comporta como un sólido plástico.

4.3.3 Estandarización o normalización de suelos

Los métodos encontrados en la búsqueda bibliográfica han sido: USCS, AASHTO y ASTM.

Se han utilizado un suelo seleccionado y uno tolerable que según el esquema de la figura 3-3 corresponden a suelos uniformemente graduados y con más del 20% de arcilla respectivamente.

4.4 DESCRIPCIÓN PROPUESTA DE MÉTODO DE ENSAYO

4.4.1 Descripción de los tipos de suelos normalizados y procedimiento necesario para fabricarlos

En este apartado se recogen clasificaciones de suelo aunque finalmente no se siguieron éstas sino el PG-3.

Como indica la norma ASTM D5141, si el ensayo no es específico del sitio, obtener una muestra de suelo representativo de la granulometría indicada en la Tabla 4-4-1 y con un índice de plasticidad (IP) menor o igual que 15.

Percent Passing	Sieve Size (opening size, mm)
100	No. 10 (2.0 mm)
80 – 100	No. 40 (0.420 mm)
70 – 90	No. 100 (0.149 mm)
50 – 70	No. 200 (0.075 mm)

Tabla 4-4-1: Norma ASTM D5141. Granulometría de la muestra de suelo .

Según la norma ASTM D7351, los suelos deben ajustarse a la siguiente granulometría e índice de plasticidad indicados en la Tabla 4-4-2.

Particle Size	Sand	Loam	Clay
D ₁₀₀ (mm)	25 > D ₁₀₀ > 3.0	10 > D ₁₀₀ > 0.3	3.0 > D ₁₀₀ > 0.02
D ₈₅ (mm)	4.0 > D ₈₅ > 0.8	0.8 > D ₈₅ > 0.08	0.008 > D ₈₅ > 0.003
D ₅₀ (mm)	0.9 > D ₅₀ > 0.2	0.15 > D ₅₀ > 0.015	0.015 > D ₅₀ > 0.0008
D ₁₅ (mm)	0.3 > D ₁₅ > 0.01	0.03 > D ₁₅ > 0.001	D ₁₅ > 0.002
Plasticity Index	N/A (nonplastic)	2 < PI < 8	10 < PI

Tabla 4-4-2: Norma ASTM D7351. Granulometría e índice de plasticidad de la muestra de suelo.

4.4.2 Definición y descripción del ensayo de colmatación

El ensayo se basa en el propuesto por (García Casuso, 2015). Se colocan el suelo y el geotextil en un tubo de metacrilato y se vierte un sucedáneo de escorrentía en flujo libre. El tubo tiene en todo momento desagüe por el fondo como se muestra en la figura 4-9. Una vez hecho esto, se extrae el geotextil y se traslada cuidadosamente para su secado y posteriormente evaluar su permeabilidad. Se mantuvo un tiempo mínimo de secado de 24 horas.



Figura 4-8: Montaje para ensayo de colmatación. Parte superior.



Figura 4-9: Montaje para ensayo de colmatación. Parte inferior.

La metodología de ensayo consiste en cuatro escorrentías. Una primera con agua y en presencia de suelo, una segunda con todos los contaminantes y en presencia de suelo y otras dos escorrentías aisladas para cal y aceite en ausencia de suelo para evaluar la influencia directa de estos dos contaminantes sobre el geotextil.

En un primer paso se coloca una capa de grava sobre un geotextil base que se apoya en una rejilla metálica bajo la que se encuentran recipientes colectores y elementos de desagüe. Este

geotextil no ha de tener una permeabilidad menor que las capas superiores. A continuación se coloca el geotextil objeto de ensayo y sobre él una capa de suelo.

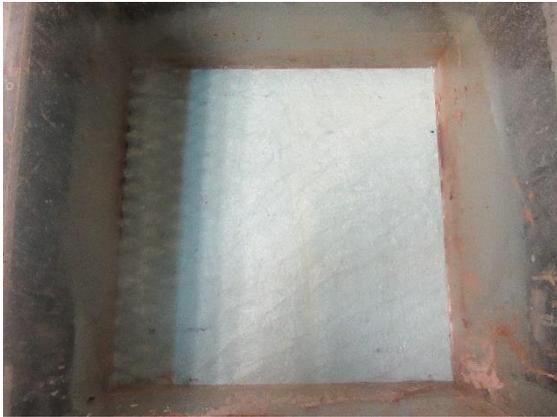


Figura 4-10: Geotextil base.



Figura 4-11: Capa de grava.

El volumen de agua para cada ensayo viene dado por:

Lluvia media anual en Santander: $1,120 \text{ m}^3/\text{m}^2 = 1,12 \text{ m}$

Lluvia en 25 años: 28 m

*Volumen de agua en una superficie de $0,3 \times 0,3 \text{ m} = 28 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} = 2,52 \text{ m}^3 = \mathbf{2520 \text{ L}}$ por
escorrentía*

Se busca un caudal para el que el dispositivo funciona correctamente y se mide con ayuda de una probeta de 1000 mL y un cronómetro. Se vierte la escorrentía y los contaminantes. El agua sola, junto con filler calizo e hidrocarburo después, junto con filler calizo en tercer lugar y junto con hidrocarburo por último, se vierten sobre el suelo como si de una precipitación se tratara.

Por lo tanto tenemos dos escorrentías con, a su vez, cinco geotextiles para cada una de ellas y dos suelos, lo que proporciona veinte combinaciones de colmatación y su correspondiente ensayo de permeabilidad. A estas hay que sumar las diez resultantes de combinar las dos escorrentías aisladas con los cinco tipos de geotextil. Se obtienen un total de treinta combinaciones.

Lo que nos interesa es llegar al estado de colmatación al final de la vida útil de los geotextiles, no llegar a la colmatación total cuando la permeabilidad final es nula, ya que esto es muy improbable.

En cuanto al tiempo de precipitación, éste estará condicionado por el caudal, para un volumen dado que será de 2520 L por escorrentía.

Las cantidades empleadas fueron aproximadamente 1 kg de filler calizo y 88 g de hidrocarburos en cada escorrentía.



Figura 4-12: Filler calizo empleado en la colmatación.



Figura 4-13: Hidrocarburos empleados en la colmatación.

En la Figura 4-14 se muestra un esquema del aparato en el que se ensayan las probetas de geotextil para obtener su permeabilidad, tanto una vez colmatado como en la caracterización del mismo.

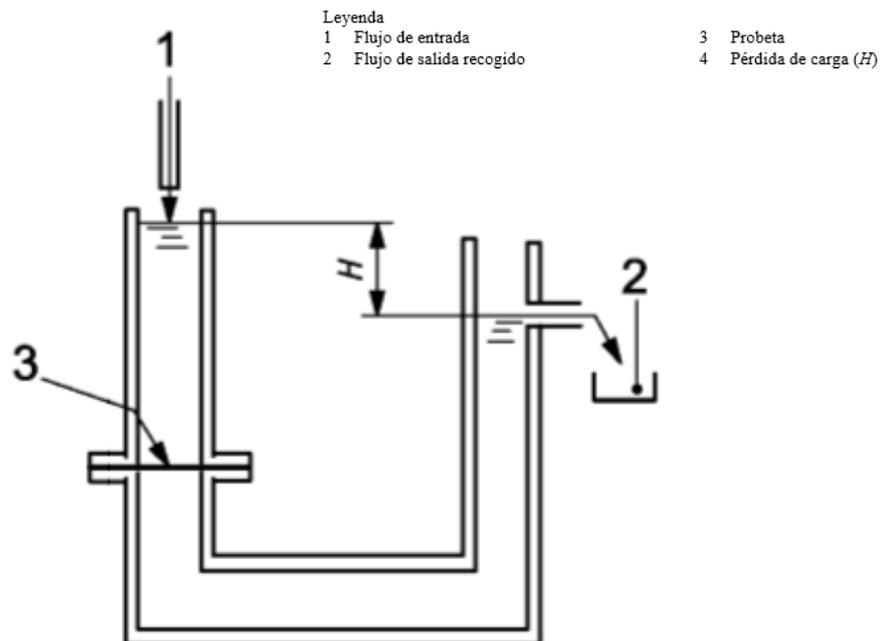


Figura 4-14: Norma UNE-EN ISO 11058 (2010). Esquema de aparato de ensayo de permeabilidad perpendicular al plano sin carga, de flujo vertical.

El ensayo de permeabilidad perpendicular al plano se realizó con una altura de columna de agua de 20 cm, tanto en la caracterización previa como después de la colmatación.



Figura 4-15: Aparato de ensayo en laboratorio de permeabilidad al agua perpendicular al plano sin carga, de flujo vertical.

4.4.3 Selección de geotextiles sobre los que se realizarán los ensayos

En total se seleccionaron cinco tipos de geotextil para la posterior formación de las probetas y su ensayo, de los cuales uno era tejido y los otros cuatro no tejidos.

El geotextil tejido era de gramaje estimado 100 g/m^2 y los no tejidos de gramajes estimados 100, 200, 300, g/m^2 . Cuatro de los geotextiles eran no tejidos dado su mayor uso en sistemas de drenaje.



Figura 4-16. Geotextil no tejido blanco 100 g/m^2 (EXP19008-1)



Figura 4-17. Geotextil tejido negro-tela cobertura solo PP 100g/m^2 (EXP19008-2)

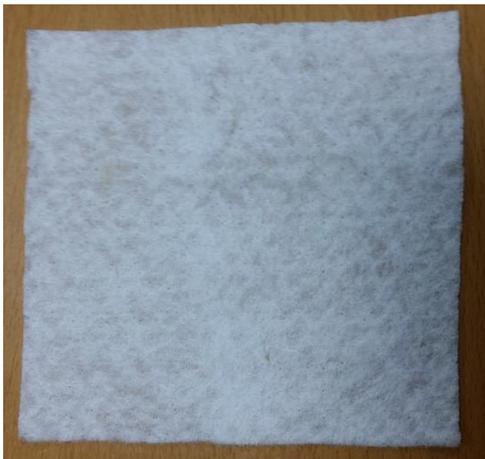


Figura 4-18. Geotextil no tejido blanco 200 g/m² (EXP19008-3)



Figura 4-19. Geotextil no tejido blanco 300 g/m² (EXP19008-4)

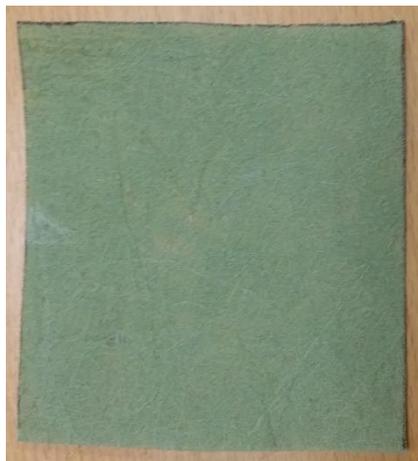


Figura 4-20. Geotextil no tejido termosoldado verde 100 g/m² (EXP19008-5)

Tras la realización de ensayos normalizados de masa por unidad de superficie los gramajes obtenidos resultaron ser: $101 \pm 2 \text{ g/m}^2$, $145 \pm 10 \text{ g/m}^2$, $144 \pm 7 \text{ g/m}^2$, $215 \pm 6 \text{ g/m}^2$, $279 \pm 7 \text{ g/m}^2$.

Tres de los geotextiles no tejidos han sido fabricados mediante agujeteado, que consiste en bajar y subir una aguja que entremezcla los hilos. El otro se fabricó mediante termosoldado, o lo que es lo mismo, colocar los hilos sobre una mesa, prensarlos y aplicar calor.

Este geotextil termosoldado está formado por un núcleo de polipropileno (70%) recubierto por polietileno (30%), mientras que el resto está compuesto de polipropileno (100%).

4.4.4 Selección de suelos sobre los que se realizará el ensayo

Dejando a un lado las indicaciones de las normativas del apartado 4.4.2 se opta por fabricar un suelo seleccionado y un suelo tolerable según se recoge en el artículo del PG-3 para terraplenes.

El suelo seleccionado presenta la granulometría que se indica en la Figura 4-21 y su composición es caliza (100%). Está formado por un 20% de suelo grueso (cernido tamiz 8 mm), un 45% de suelo medio (cernido tamiz 4mm) y un 35% de suelo fino (cernido tamiz 2 mm).

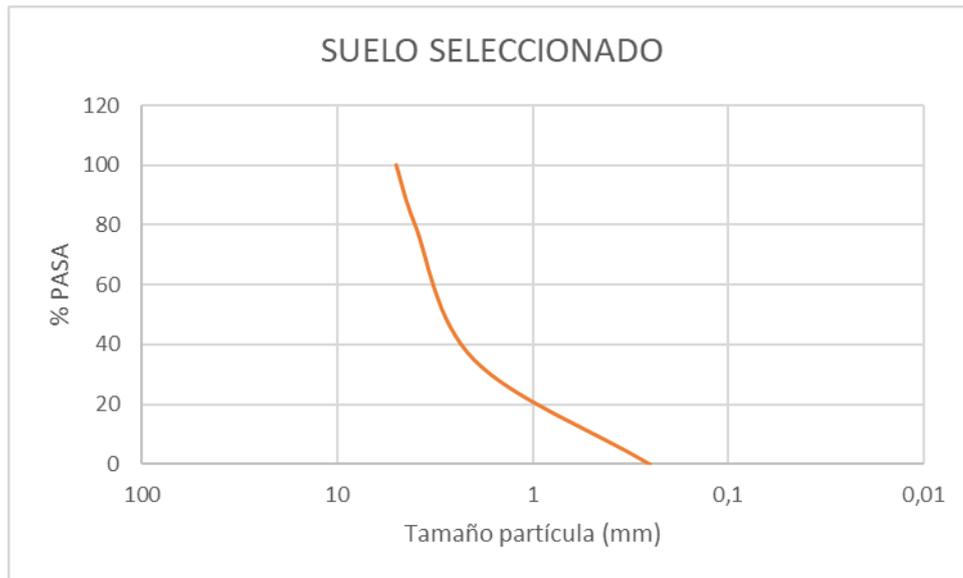


Figura 4-21: Curva granulométrica del suelo seleccionado.

El suelo tolerable presenta la granulometría de la Figura 4-22 y se trata de un suelo arcilloso. Para su caracterización se han realizado los ensayos de límite líquido y límite plástico, proporcionando un valor del límite líquido inferior a 65 como corresponde a un suelo tolerable.

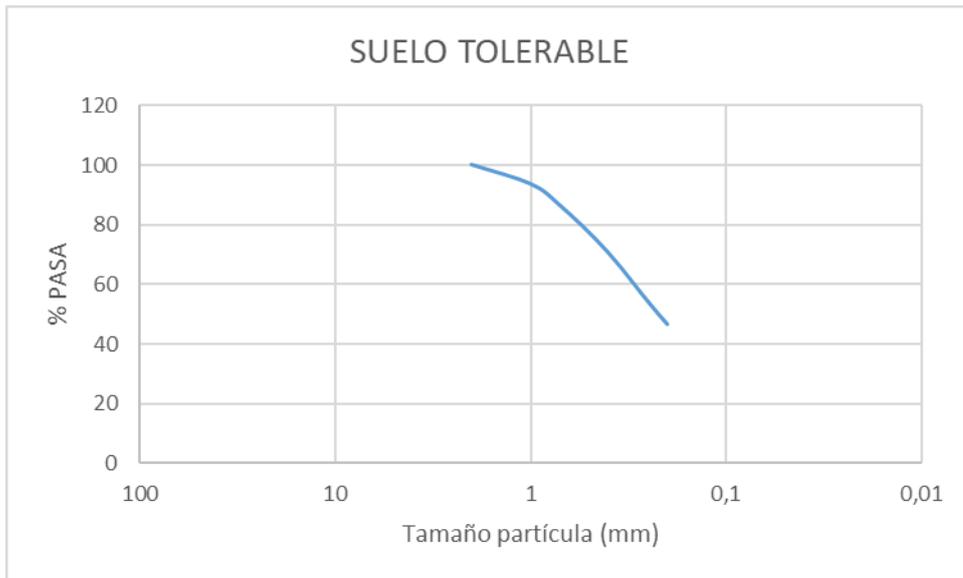


Figura 4-22 Curva granulométrica del suelo tolerable.

Una vez decididos la granulometría del suelo y su composición se llevaron a la mezcladora para su fabricación.



Figura 4-23: Suelo tolerable.



Figura 4-24: Suelo seleccionado.

LÍMITE LÍQUIDO LL	30,3
LÍMITE PLÁSTICO LP	19,45
ÍNDICE DE PLASTICIDAD IP	10,85

Tabla 4-4-3: Límites de Atterberg de la arcilla.

4.4.5 Medición de caudales, datos básicos y organización de ensayos de colmatación

Características de la sala 2 donde se realizaron ensayos de tracción, espesor y masa por unidad de superficie:

- Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Humedad: $65\% \pm 5\%$

Características de la sala donde se realizaron experimentos de colmatación:

- Humedad: 80 %

Los geotextiles empleados son los mostrados en la Tabla 4-4-4, acopiados en el almacén de LAGUC a fecha de inicio del proyecto.

Identificación LAGUC	Identificación cliente	Marca	Modelo
EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	INTERMAS	TECHDRAIN GTG 512
EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	SICOR	Malla antihierbas
EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	Edilfloor	GEODREN A5
EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	Edilfloor	GEODREN PPST 300 P
EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	Terram	Inbitex

Tabla 4-4-4: Identificación de geotextiles.

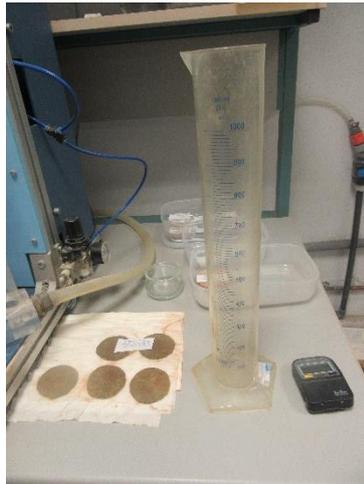


Figura 4-25: Probeta de 1 L y cronómetro de 0,01 s de precisión utilizados en la medición de los caudales.

En cada experimento de colmatación se midió el caudal con los utensilios mostrados en la Figura 4-25. Con el cronómetro se contó el tiempo que tardaba en llenarse la probeta, obteniendo así los datos de los caudales.

Escenario	Tipo de escorrentia	Clasificación PG-3 del suelo	Tipo de suelo
1	Sólo agua	seleccionado	caliza
2	Sólo agua	tolerable	arcilla
3	Agua con todos los contaminantes	seleccionado	caliza
4	Agua con todos los contaminantes	tolerable	arcilla
5	Agua con filler calizo		
6	Agua con hidrocarburos		

Tabla 4-4-5: Escenarios de colmatación desarrollados en laboratorio.

ENSAYOS DE COLMATACIÓN				
Nº escorrentía	tipo escorrentía	tipo de suelo	tipo de geotextil	Identificación del geotextil
1	1	seleccionado	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²
2	1	tolerable	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²
3	1	seleccionado	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²
4	1	seleccionado	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²
5	1	seleccionado	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²
6	1	seleccionado	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²
7	4	seleccionado	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²
8	3	ausencia	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²
9	3	ausencia	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²
10	3	ausencia	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²
11	3	ausencia	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²
12	3	ausencia	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²
13	4	seleccionado	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²
14	4	seleccionado	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²
15	4	seleccionado	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²
16	4	seleccionado	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²
17	1	tolerable	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²
18	1	tolerable	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²
19	1	tolerable	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²
20	1	tolerable	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²
21	2	ausencia	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²
22	2	ausencia	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²
23	2	ausencia	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²
24	2	ausencia	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²
25	2	ausencia	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²
26	4	tolerable	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²
27	4	tolerable	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²
28	4	tolerable	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²
29	4	tolerable	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²
30	4	tolerable	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²

Tabla 4-4-6: Conjunto de ensayos de colmatación desarrollados en laboratorio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados de los ensayos de caracterización del suelo arcilloso

Como se muestra en el Anexo A se obtuvo un índice de plasticidad de 10,85, así como un límite líquido de 30,3 y un límite plástico de 19,45. El límite líquido se determinó mediante un método gráfico a partir de los puntos que se recogen en la Tabla 5-1.

Nº golpes	% humedad
34	27,74
24	33,29

Tabla 5-5-1: Resultados obtenidos en ensayo de límite líquido.

5.2 Resultados de los ensayos de tracción de geotextiles

			GTX-NT BLANCO 100 g/m ²	GTX-T NEGRO 100 g/m ²	GTX-NT BLANCO 200 g/m ²	GTX-NT BLANCO 300 g/m ²	GTX-NT VERDE 100 g/m ²
Resistencia a la tracción	KN/m	MD	15,95	22,37	7,74	10,69	21,67
		CMD	14,21	16,76	9,7	7,88	25,99
Deformación bajo carga máxima	%	MD	58,78	14,06	61,17	25,6	64,59
		CMD	46,75	11,39	40,9	23,07	73,74

Tabla 5-5-2: Resultados obtenidos en ensayos de resistencia a la tracción.

5.3 Resultados de los ensayos de abertura característica de geotextiles

		GTX-NT BLANCO 100 g/m²	GTX-T NEGRO 100 g/m²	GTX-NT BLANCO 200 g/m²	GTX-NT BLANCO 300 g/m²	GTX-NT VERDE 100 g/m²
Abertura característica (O₉₀) - Porometría	μm	107	224	70	65	145

Tabla 5-5-3: Propiedades físicas de los geotextiles.

5.4 Resultados de los ensayos de masa por unidad de superficie y espesor

Se ha comprobado experimentalmente que los geotextiles de mayor masa son también los de mayor espesor. A mayor espesor más facilidad de colmatación ya que aumenta la probabilidad de que las partículas del suelo entren en contacto con los hilos.

		GTX-NT BLANCO 100 g/m²	GTX-T NEGRO 100 g/m²	GTX-NT BLANCO 200 g/m²	GTX-NT BLANCO 300 g/m²	GTX-NT VERDE 100 g/m²
Espesor	mm	0,872	0,239	1,181	2,86	0,711
Masa por unidad de superficie	g/m²	144	101	215	279	145

Tabla 5-5-4: Propiedades físicas de los geotextiles.

5.5 Resultados de los ensayos de permeabilidad de geotextiles

Los resultados arrojados por los ensayos de permeabilidad al agua perpendicular al plano sin carga son los mostrados en la Figura 5-1. Nos permiten decir que el geotextil menos permeable con gran diferencia es el tejido de color negro de 100 g/m², el más permeable es el no tejido de color blanco de 100 g/m². Los otros tres son valores intermedios más próximos al máximo que al mínimo.

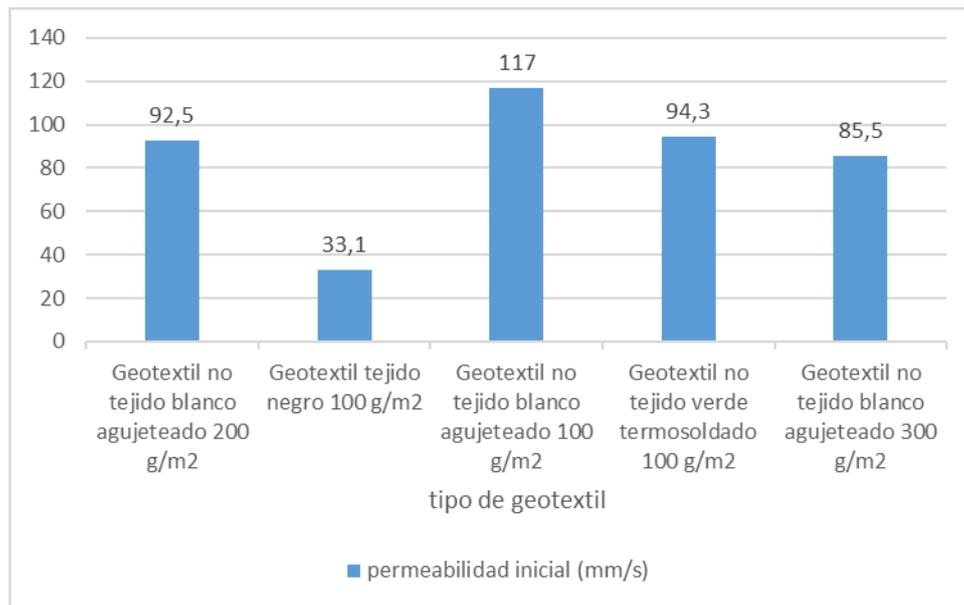


Figura 5-1: Valores de permeabilidad característicos de los geotextiles.

5.6 Resultados de valores de coeficientes de reducción de permeabilidad por colmatación obtenidos en el trabajo.

ensayos de colmatación							
Nº escorrentía	tipo escorrentía	tipo de suelo	tipo de geotextil	Identificación	permeabilidad inicial (mm/s)	permeabilidad final (mm/s)	C _R
1	1	seleccionado	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	92,5	38,1	2,42782152
2	1	tolerable	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	92,5	28,5	3,24561404
3	1	seleccionado	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	33,1	46,2	0,71645022
4	1	seleccionado	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	117	72,5	1,6137931
5	1	seleccionado	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	94,3	40,9	2,30562347
6	1	seleccionado	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	85,5	17,2	4,97093023
7	4	seleccionado	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	92,5	22,8	4,05701754
8	3	ausencia	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	92,5	80,4	1,15049751
9	3	ausencia	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	33,1	33,3	0,99399399

10	3	ausencia	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	117	94,3	1,2407211
11	3	ausencia	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	94,3	98,3	0,95930824
12	3	ausencia	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	85,5	59,1	1,44670051
13	4	seleccionado	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	33,1	20,4	1,62254902
14	4	seleccionado	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	117	48,5	2,41237113
15	4	seleccionado	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	94,3	17,1	5,51461988
16	4	seleccionado	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	85,5	13,6	6,28676471
17	1	tolerable	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	33,1	45,4	0,72907489
18	1	tolerable	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	117	71,6	1,63407821
19	1	tolerable	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	94,3	72,7	1,29711142
20	1	tolerable	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	85,5	36	2,375
21	2	ausencia	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	92,5	34,1	2,71260997

22	2	ausencia	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	33,1	46,1	0,71800434
23	2	ausencia	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	117	125,7	0,93078759
24	2	ausencia	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	94,3	106,1	0,88878417
25	2	ausencia	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	85,5	17,2	4,97093023
26	4	tolerable	EXP19008-3	GTX NO TEJIDO BLANCO 200 g/m ²	92,5	50,6	1,82806324
27	4	tolerable	EXP19008-2	GTX TEJIDO NEGRO 100 g/m ²	33,1	34,8	0,95114943
28	4	tolerable	EXP19008-1	GTX NO TEJIDO PP BLANCO 100 g/m ²	117	93,4	1,25267666
29	4	tolerable	EXP19008-5	GTX NO TEJIDO VERDE 100 g/m ²	94,3	91,8	1,02723312
30	4	tolerable	EXP19008-4	GTX NO TEJIDO BLANCO 300 g/m ²	85,5	39,2	2,18112245

Tabla 5-5-5: Valores del coeficiente de reducción de permeabilidad por colmatación obtenidos.

5.7 Discusión

Los valores obtenidos de los coeficientes de reducción para la primera escorrentía sólo con agua son los representados en la Figura 5-5-2. Se produce una mayor colmatación con el suelo granular calizo en el geotextil no tejido de 300 g/m² y en el no tejido termosoldado de 100 g/m².

El geotextil tejido experimenta un ligero incremento de permeabilidad que probablemente sea atribuible a la manipulación durante el traslado de la muestra.

Por el contrario, el geotextil no tejido de 200 g/m² ha sufrido una mayor colmatación bajo el suelo arcilloso.

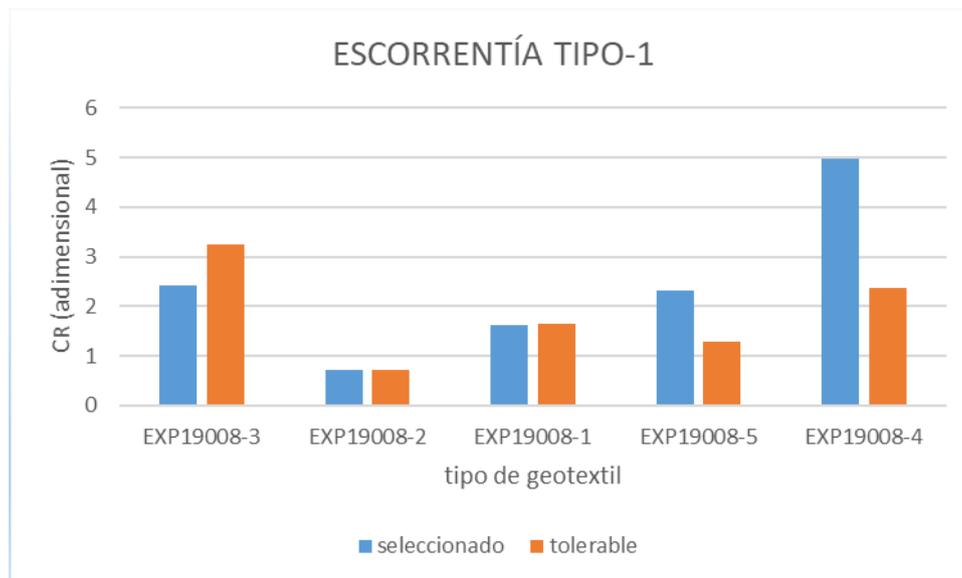


Figura 5-2: Comparación de los coeficientes de reducción de permeabilidad por colmatación obtenidos para cada geotextil según la clasificación de los suelos.

Las siguientes figuras clarifican los resultados obtenidos sobre la influencia directa de los contaminantes.

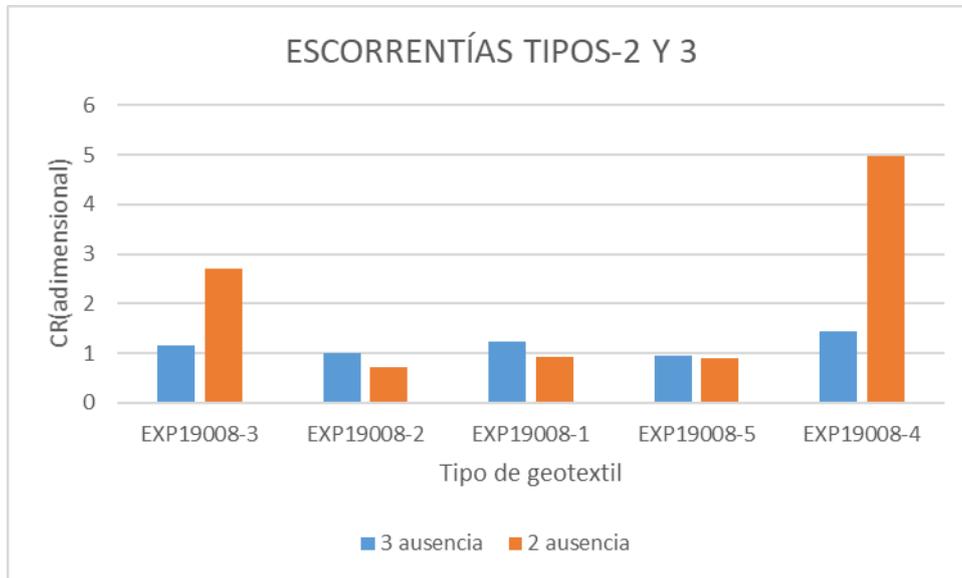


Figura 5-3: Comparación de valores del coeficiente de reducción para cada geotextil en las escorrentías en ausencia de suelo, según los contaminantes.

Para mejor comprensión de la influencia relativa de cada contaminante se ha elaborado la Figura 5-5-3, la cual indica que en los tres geotextiles de 100 g/m² la permeabilidad aumenta ligeramente, pero en los que se minorara, esta minoración es mayor para el filler calizo que para los hidrocarburos, en los geotextiles no tejidos agujeteados de color blanco de 200 y 300 g/m².

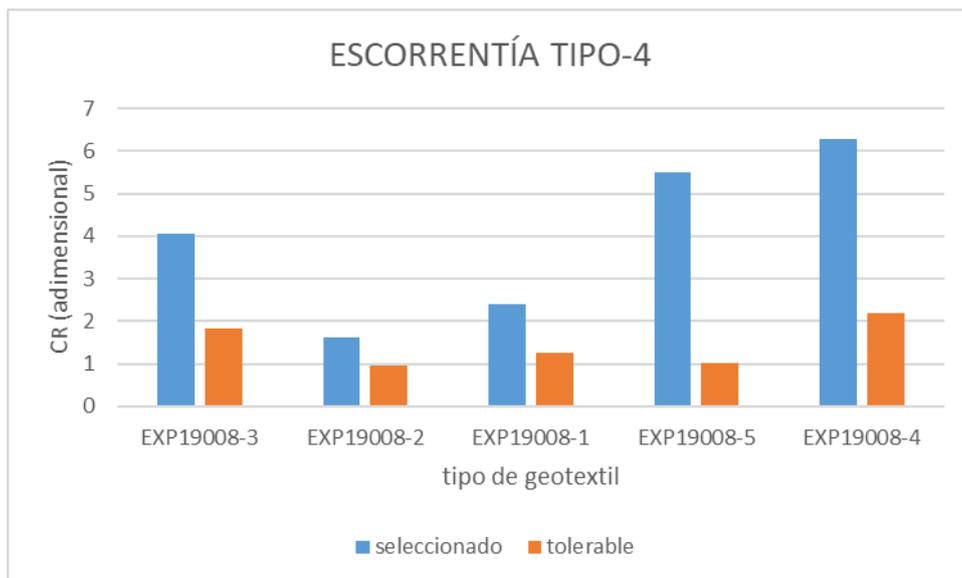


Figura 5-4: Comparación de valores de coeficientes de reducción de permeabilidad por colmatación para cada geotextil según la clasificación de los suelos y sometido a escorrentía con todos los contaminantes.

La Figura 5-5-4 muestra una tendencia a una colmatación más intensa en los casos en que el geotextil está colocado bajo el suelo granular calizo que cuando lo está bajo el suelo arcilloso. Esto es debido a que el suelo arcilloso se colmata por sí mismo sin llegar a colmatar el geotextil, dado que interactúa con el agua formando una pasta, contrariamente a lo que ocurre con la caliza.

Este también es el motivo por el que algunos experimentos se detuvieron antes de tiempo sin llegar a alcanzar el volumen previsto.

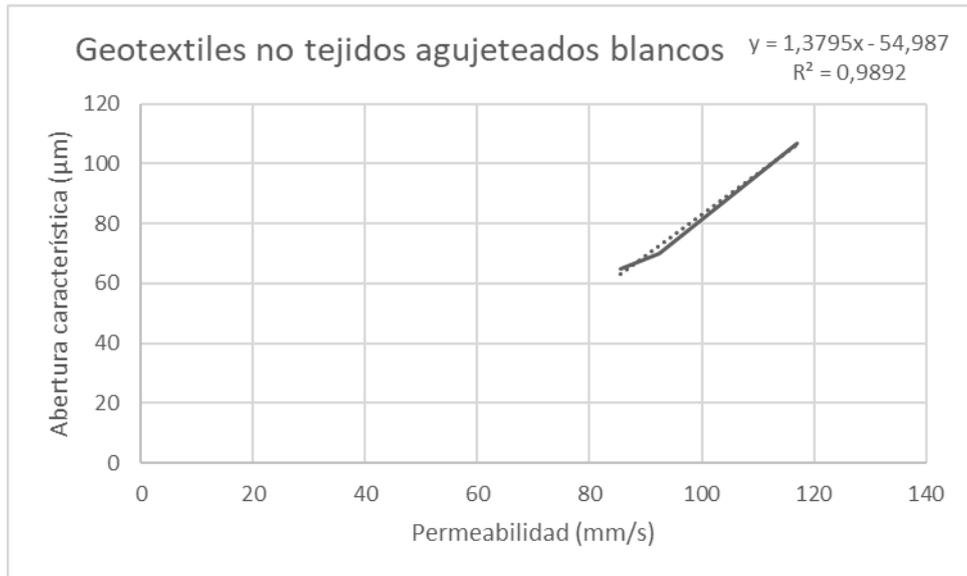


Figura 5-5: Relación entre abertura característica y permeabilidad.

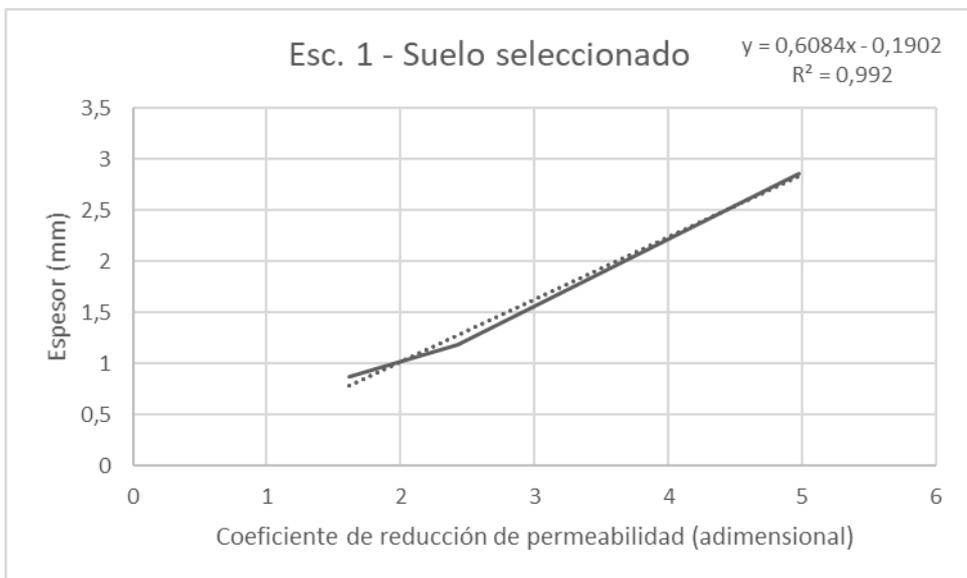


Figura 5-6: Relación entre espesor y pérdida de permeabilidad.

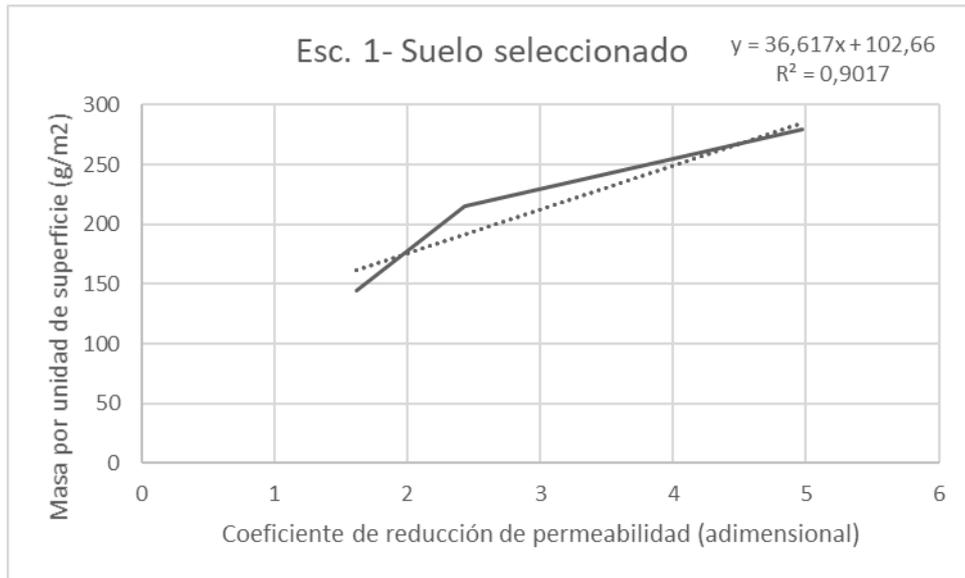


Figura 5-7: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.

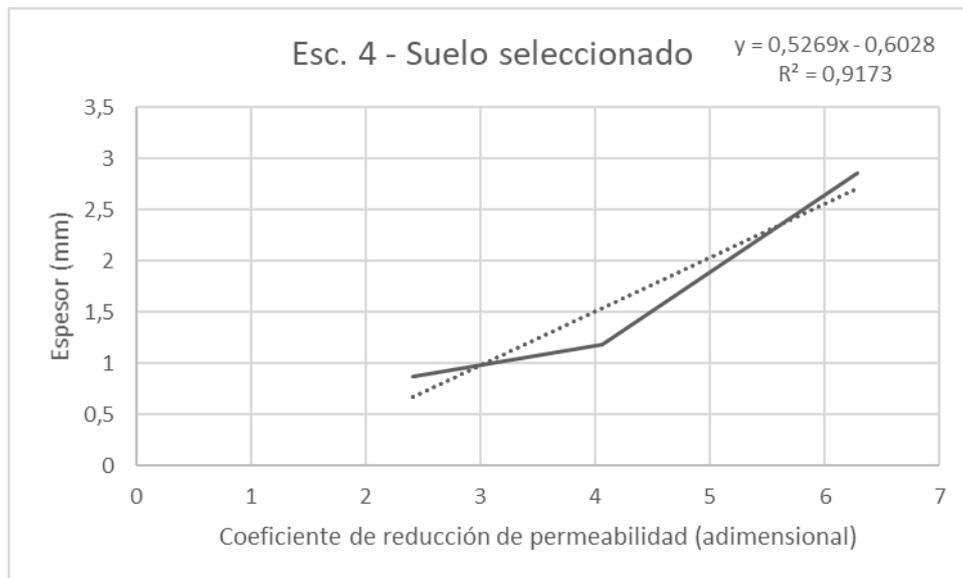


Figura 5-8: Relación entre espesor y pérdida de permeabilidad.

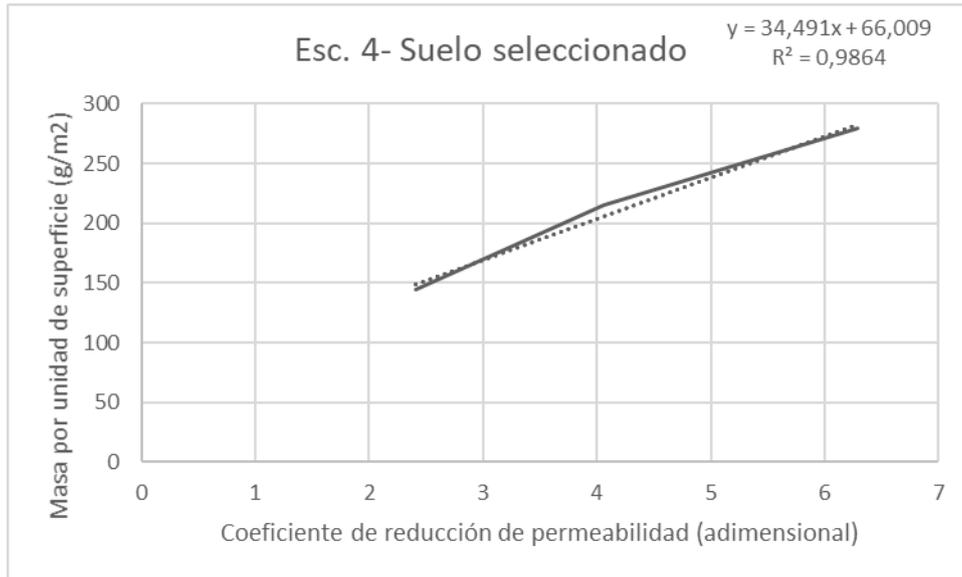


Figura 5-9: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.

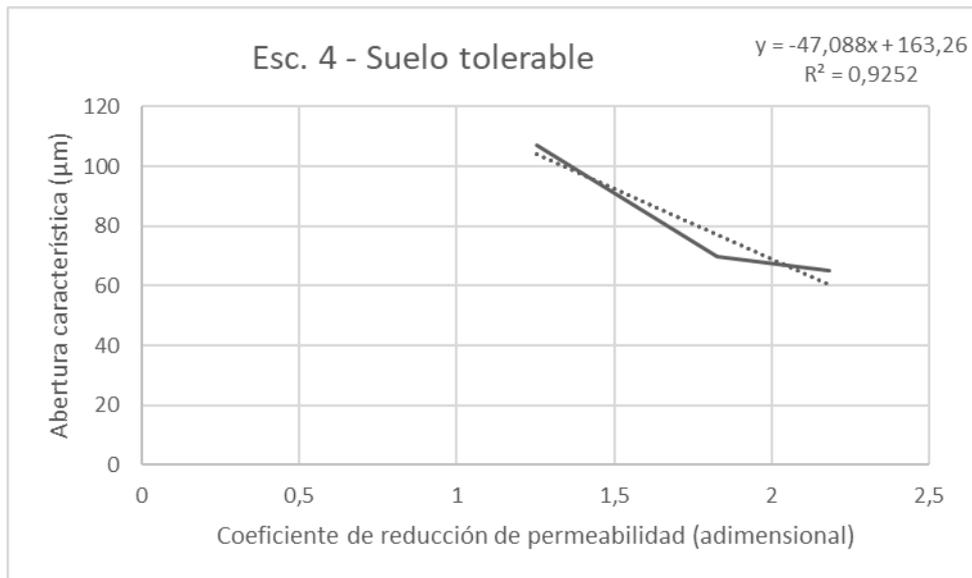


Figura 5-10: Relación entre abertura característica y pérdida de permeabilidad.

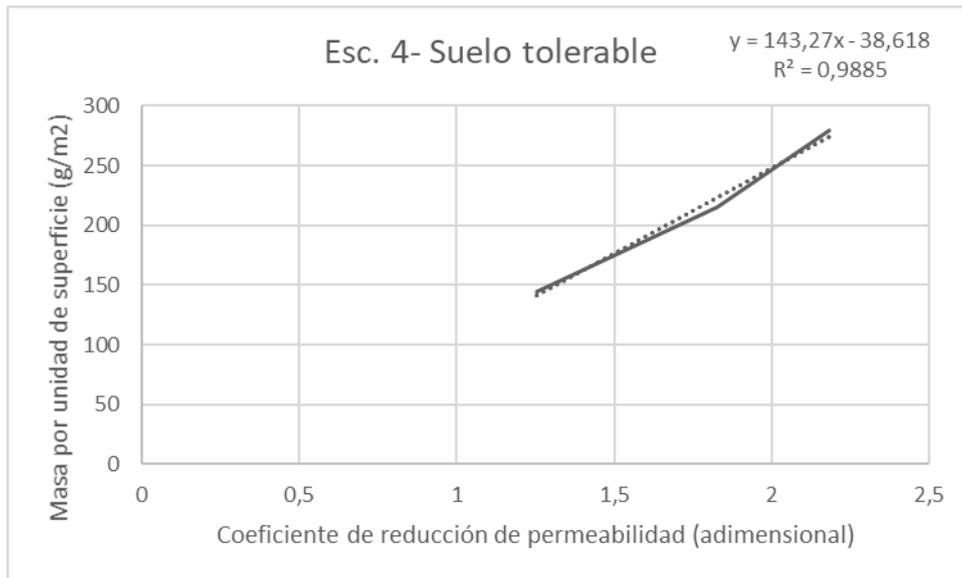


Figura 5-11: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.

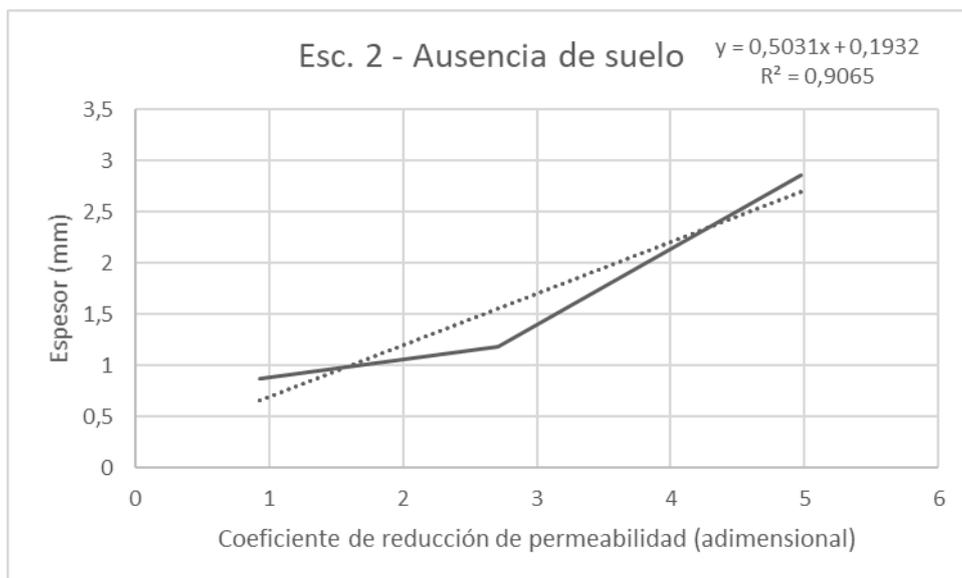


Figura 5-12: Relación entre espesor y pérdida de permeabilidad.

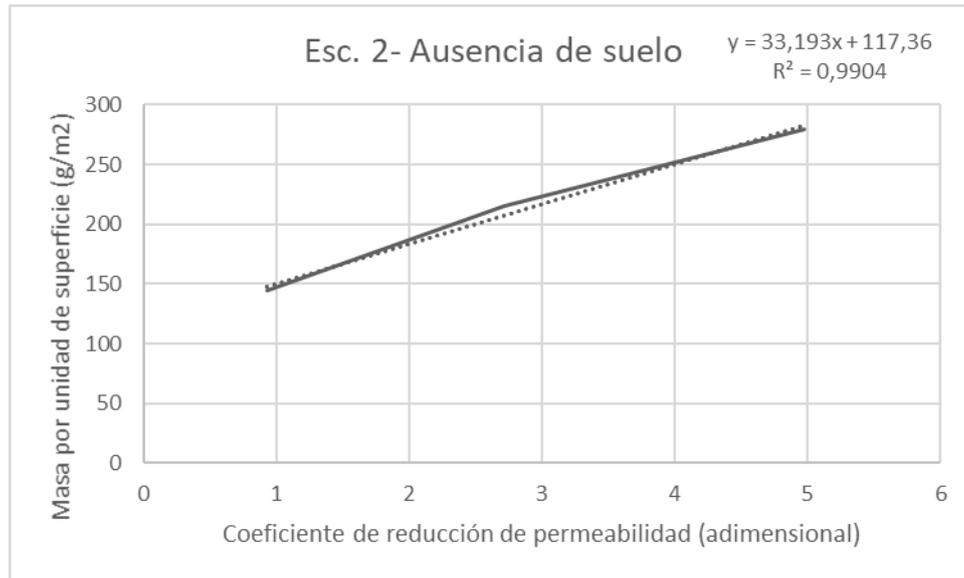


Figura 5-13: Relación entre masa por unidad de superficie y pérdida de permeabilidad.

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones generales

La principal conclusión que se extrae de los resultados obtenidos es que el rango en el que se encuentran los coeficientes de reducción por colmatación, se corresponde con los consultados en la bibliografía.

En el caso particular del geotextil no tejido verde de 100 g/m² se hace necesaria una altura de la columna de agua mayor para que tenga lugar la filtración, comprobándose que para alturas pequeñas tiende a repeler el agua, debido a que es termosoldado, lo que le hace menos apto para los firmes permeables en esas condiciones.

Corresponde resaltar el comportamiento genérico para todos los geotextiles hallado en el caso de la escorrentía con todos los contaminantes.

Las figuras que aparecen al final del documento, indican que la reducción de permeabilidad aumenta con el aumento de espesor y masa, y aumenta con la disminución de abertura característica.

El presente trabajo aporta unos rangos del coeficiente de reducción de permeabilidad por colmatación que parecen ir en la buena dirección, que se muestran en las siguientes tablas.

Aplicación	Coficiente de reducción de permeabilidad por colmatación	
	Suelo seleccionado	Suelo tolerable
Firmes permeables	0,7-6,3	0,7-3,3

Tabla 6-1: Rangos de valores del coeficiente de reducción obtenidos.

Aplicación	Coficiente de reducción de permeabilidad por colmatación		
	GTX-T (~ 100-150 g/m ²)	GTX-NT (hasta 300 g/m ²)	GTX Termosoldado
Firmes permeables	0,7-1,6	0,9-6,3	0,9-5,5

Tabla 6-2: Rangos de valores del coeficiente de reducción obtenidos.

Aplicación	Coficiente de reducción de permeabilidad por colmatación					
	GTX-T (~ 100-150 g/m ²)		GTX-NT (hasta 300 g/m ²)		GTX Termosoldado	
	SS	ST	SS	ST	SS	ST
Firmes permeables	0,7-1,6	0,7-0,9	1,6-6,3	1,3-3,2	2,3-5,5	1,0-1,3

Tabla 6-3: Rangos de valores del coeficiente de reducción obtenidos.

6.2 Futuras líneas de investigación

Puesto que se ha observado que los geotextiles de menor gramaje (100 g/m²) se colmatan menos, podría ser interesante estudiar la superposición de varios de ellos en lugar de utilizar uno de más gramaje.

Además, siguiendo con este mismo tema, podría también ser interesante utilizar otros contaminantes de la escorrentía superficial urbana.

Referencias

- García Casuso, C. (Julio de 2015). *Trabajo Fin de Máster. Estudio de ahorros y geotextiles para firmes permeables*.
- Geotextile filter design, application and product selection guide. (s.f.).
- Geotextiles and geomembranes in civil engineering*. (1994). Rotterdam.
- Gómez-Ullate Fuente, E. (Diciembre de 2010). Tesis Doctoral. Estudio de un aparcamiento de firmes filtrantes para la mejora de la gestión sostenible de las aguas urbanas mediante el almacenamiento y valorización del agua de lluvia.
- Koerner, R. M. (1998). *Designing with geosynthetics*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Miszowska, A., Lenart, S., & Koda, E. (2017). Changes of Permeability of Nonwoven Geotextiles due to Clogging and Cyclic Water Flow in Laboratory Conditions. *MDPI*.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. PG-3*. (2015).
- UNE 103-103-94 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande. (Febrero de 1994).
- UNE EN 12224 Geotextiles y productos relacionados. Determinación de la resistencia al envejecimiento a la intemperie. (s.f.).
- UNE EN 12225 Geotextiles y productos relacionados. Determinación de la resistencia al envejecimiento a la intemperie. (s.f.).
- UNE EN 12225 Geotextiles y productos relacionados. Método para determinar la resistencia microbiológica mediante un ensayo de enterramiento en el suelo. (s.f.).
- UNE EN 12226 Geotextiles y productos relacionados. Ensayos generales para la evaluación después del ensayo de durabilidad. (s.f.).
- UNE EN 965 Geotextiles y productos relacionados. Determinación de la masa por unidad de superficie. (Septiembre de 2005).
- UNE EN ISO 10319 Geotextiles. Ensayo de tracción para probetas anchas. (Octubre de 2015).
- UNE EN ISO 10320 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Identificación in situ. (s.f.).
- UNE EN ISO 11058 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga. (Julio de 2010).

UNE EN ISO 12236 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Ensayo de punzonado estático (ensayo CBR). (s.f.).

UNE EN ISO 12956 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de la medida de abertura característica. (Julio de 2010).

UNE EN ISO 12958 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de la capacidad de flujo en su plano. (s.f.).

UNE EN ISO 13431 Geotextiles y productos relacionados. Determinación del comportamiento a la fluencia en tracción y a la rotura a la fluencia en tracción. (s.f.).

UNE ENV 12447 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Método para la determinación de la resistencia a la hidrólisis. (s.f.).

UNE ENV ISO 12960 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Método de ensayo para determinar la resistencia a los líquidos. (s.f.).

UNE ENV ISO 13438 Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Metodo de ensayo de protección para la determinación de la resistencia a la oxidación. (s.f.).

UNE-103-104-93 Determinación del límite plástico de un suelo. (Febrero de 1993).

UNE-EN ISO 10318-1 Geosintéticos. Parte 1: Términos y definiciones. (Noviembre de 2015).

UNE-EN ISO 17892-1 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 1: Determinación de la humedad. (Septiembre de 2015).

UNE-EN ISO 9863-1 Geosintéticos. Determinación del espesor a presiones especificadas. Parte 1: Capas individuales. (Junio de 2017).