

21
22



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ACATLAN

"USO DE GEOTEXTILES EN OBRAS DE PROTECCION
PARA CONTROL Y PREVENCION DE LA EROSION
EN MARGENES DE RIOS Y COSTAS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
AARON ANDRES SAMANO ALVAREZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.



1991



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

C O N T E N I D O

	Pag.
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. PROBLEMAS DE EROSION EN MARGENES DE RIOS Y COSTAS	
1.1 Erosión fluvial	6
1.1.1 Reducción de áreas cultivables	7
1.1.2 Inestabilidad de las márgenes	3
1.1.3 Afectación de estructuras de cruce y obras adya centes	11
1.1.4 Arrastre de materiales	13
1.1.5 Azolve de cauces y formación de depósitos . . .	15
1.2 Erosión marina	16
1.2.1 Destrucción de playas	17
1.2.2 Licuación inducida en sedimentos marinos . . .	19
1.2.3 Afectación de obras marítimas y otras construc- ciones	20
1.2.4 Transporte litoral	21
1.2.5 Depósitos de materiales	21
CAPITULO 2. OBRAS DE PROTECCION PARA CONTROL Y PREVENCION DE LA EROSION	
2.1 Obras de protección en los rios	27
2.1.1 Protecciones marginales	29
2.1.1.a Cubiertas vegetales	29
2.1.1.b Mhuacelados	30
2.1.1.c Pedraplenes	33
2.1.1.d Muros	36
2.1.2 Diques longitudinales	39
2.1.3 Espigones	41

2.2	Obras de protección costera	42
2.2.1	Estructuras paralelas a la costa	44
2.2.1.a	Revestimientos	44
2.2.1.b	Muros	46
2.2.1.c	Diques	49
2.2.1.d	Rompeolas	50
2.2.2	Estructuras perpendiculares a la costa	52
2.2.2.a	Escolleras	52
2.2.2.b	Espigones	53

CAPITULO 3. FILTROS DE MATERIAL GRADUADO

3.1	Descripción	56
3.2	Aplicaciones	57
3.2.1	Subdrenaje en vías terrestres	58
3.2.2	Drenaje en muros de retención	60
3.2.3	Control del flujo de agua en presas de tierra y enrocamiento	62
3.2.4	Obras para la prevención y el control de la ero- sión en márgenes de ríos y costas	65
3.3	Requisitos esenciales	66
3.4	Criterios de diseño	66
3.4.1	Recomendación para evitar la tubificación	67
3.4.2	Recomendación para obtener una permeabilidad a- decuada	68
3.4.3	Recomendaciones adicionales	64
3.4.4	Diseño a partir del tamaño promedio de poros	71

CAPITULO 4. LOS GEOTEXILES, SUS PROPIEDADES Y FUNCIONES

4.1	Descripción	75
4.1.1	Materias primas	75
4.1.2	Elementos constitutivos	79
4.1.3	Fibras de geotextiles	79
4.1.3.a	Geotextiles tejidos	79
4.1.3.b	Geotextiles no-tejidos	80
4.1.3.c	Geotextiles ligados	32
4.2	Propiedades	82
4.2.1	Propiedades físicas (Densidad y Masa por unidad de área)	84
4.2.2	Propiedades mecánicas (Compresibilidad, Resistencia a tensión, a la fatiga, al reventamiento, al desgarramiento, a impactos, a la perforación, Fricción entre suelo y geotextil, y Adherencia)	85
4.2.3	Propiedades hidráulicas (Porosidad, Porcentaje de área abierta, Tamaño equivalente de poros, - Permeabilidad, Transmisividad, Capacidad de retención e Impermeabilidad)	94
4.2.4	Propiedades de durabilidad (Susceptibilidad al flujo plástico, Resistencia a la abrasión y Susceptibilidad a la obstrucción)	103
4.2.5	Propiedades de resistencia al intemperismo (Resistencia a sustancias químicas y a variaciones de temperatura, Efecto de los rayos ultravioleta, Resistencia a los agentes biológicos y Deterioro por estar bajo tierra)	109

4.3	Funciones y aplicaciones	112
4.3.1	Separación	112
4.3.2	Refuerzo	114
4.3.3	Filtración	116
4.3.4	Drenaje	117
4.4	Bases para el diseño o la elección de un geotextil	118
4.4.1	Diseño por costo	119
4.4.2	Diseño basado en especificaciones	119
4.4.3	Diseño por función	120

CAPITULO 5. USO DE GEOTEXILES COMO FILTRO

5.1	Mecanismo de operación	123
5.2	Requerimientos generales	127
5.3	Propiedades que determinan la eficiencia	128
5.3.1	Permitividad	129
5.3.2	Tamaño equivalente de poros	131
5.4	Desarrollo de criterios para la elección	133
5.4.1	Adecuación de las reglas clásicas para filtros granulares	133
5.4.2	Adopción de una teoría especial para geotextiles	136
5.4.2.a	Requisito de permeabilidad	137
5.4.2.b	Requisito de retención	141
5.5	Resultados de pruebas efectuadas en modelos	151
5.6	Experiencias obtenidas en obras realizadas	155

CAPITULO 6. EXPERIENCIAS DE LA UTILIZACION DE GEOTEXILES EN OBRAS DE PROTECCION	
6.1	Reconstrucción de un muro de enrocamiento en la Costa Oeste de los Estados Unidos 157
6.2	Formación de un tipo especial de espigón en Ontario, Canadá 158
6.3	Control de la erosión en los afluentes del Río Mississippi, en Estados Unidos 159
6.4	Protección de márgenes de canales artificiales para la navegación, en Alemania Occidental . . 161
6.5	Lucha contra la erosión para proteger al antiguo Faro del Cabo Hatteras, Estados Unidos . . 163
6.6	Conservación de playas que constituyen un atractivo turístico en los Estados Unidos 165
6.7	Aplicaciones recientes en presas de tierra y en rocamiento 169
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 174	

INTRODUCCION

Los materiales de construcción son elementos indispensables en todas las obras de ingeniería civil puesto que constituyen la materia prima requerida para llegar al producto terminado. En la mayoría de los casos éstos son de origen natural, como los obtenidos de suelos y rocas; la razón de ello es que su costo suele ser muy bajo.

Aunque la anterior es una gran ventaja, en ocasiones no presentan las características deseadas y es necesario someterlos a diferentes tratamientos. Esta dificultad ha traído como consecuencia el desarrollo de nuevas tecnologías que consideran el uso de materiales artificiales como alternativa o complemento de los materiales naturales.

Particularmente, en el área de Geotecnia se han ido introduciendo desde hace ya mucho tiempo una serie de materiales manufacturados denominados "Geosintéticos", cuyo uso está orientado hacia las diversas obras en las que intervienen los ingenieros especialistas en mecánica de suelos. Se trata simplemente de materiales plásticos que se obtienen a partir de los hidrocarburos.

Existen cuatro grupos principales de materiales Geosintéticos:

- 1) Geotextiles
- 2) Geomembranas
- 3) Georedes
- 4) Geocompuestos

Los Geotextiles, que constituyen el grupo más grande, son telas flexibles y permeables formadas por fibras sintéticas en lugar de fibras naturales como el algodón, la lana o la seda. Dichas fibras se convierten en una tela mediante maquinaria de tejido convencio-

nal o son unidas de una manera aleatoria (no-tejida), mediante un proceso químico, térmico o mecánico.

Existen alrededor de 30 áreas de aplicación específica de los Geotextiles, en las que realizan por lo menos una de las siguientes funciones básicas: separación, refuerzo, filtración y drenaje, o bien impermeabilización, en el caso de ser impregnados con alguna resina.

Las Geomembranas, que forman el segundo grupo más importante, son hojas delgadas de plástico, más flexibles que los geotextiles, que se usan como cubiertas impermeables para almacenamiento de líquidos o aislamiento de materiales sólidos dañinos (residuos nucleares).

Las Georedes representan actualmente un grupo pequeño de productos, pero que poco a poco ha ido creciendo; como su nombre lo indica, consisten en redes o mallas de plástico con aberturas muy grandes, comparadas con las de los Geotextiles, y tienen básicamente funciones de refuerzo y/o separación.

Por último, están los productos denominados Geocompuestos, que se forman de las diferentes combinaciones entre los materiales de los tres grupos anteriores, para complementar u optimizar alguna o algunas de las funciones que realizan.

Siendo los Geotextiles el grupo que ha tenido mayor difusión, resulta interesante analizar la factibilidad técnica y económica para su uso en lugar de otros materiales. Entre las muchas aplicaciones que actualmente se les reconocen, una de las más discutidas es la que tienen en obras relacionadas con el control y la prevención de la erosión, como sustitutos de los filtros de material granular, puesto que con ésta iniciaron su desarrollo, razón por la cual en un principio se les denominaba telas filtrantes.

En cuanto a esta aplicación particular, algunas de las interrogantes que todavía resulta interesante contestar son:

- ¿ En qué casos puede ser particularmente conveniente usarlos ?
- ¿ Cuales son las propiedades más importantes que hay que tomar en cuenta para su elección ?
- ¿ Cómo son consideradas estas propiedades en los criterios de diseño existentes ?
- ¿Cuál de los criterios es el más recomendable ?
- ¿ Existe algún tipo de tela que sea especialmente adecuado ?
- ¿ Es la resistencia al intemperismo una gran limitante para su aplicación, o lo es más la reducción de la permeabilidad con el paso del tiempo ?
- ¿ De que manera contribuye la realización de experimentos a la elección definitiva ?

Para contestar a tales preguntas y satisfacer un gran interés personal por el tema, el suscrito optó por realizar el presente trabajo de tesis, con el que además se espera contribuir al mejoramiento de los proyectos para la construcción de obras de control de erosión, fluviales o marítimas, así como a la difusión de los nuevos avances de la ingeniería geotécnica.

En forma concreta, el objetivo principal de este trabajo será: Examinar las ventajas y desventajas del uso de geotextiles como sustitutos de los filtros de capas múltiples o de material graduado, en las obras de protección diseñadas para controlar o prevenir la erosión de márgenes de ríos y costas; con objeto de proporcionar, para los casos en que resulte conveniente utilizarlos, recomendaciones que sirvan como referencia en la tarea de elegir el tipo de geotextil que mejor se ajuste a las condiciones geotécnicas y geohidráulicas del sitio y la estructura en que vaya a ser instalado, contribuyendo de esta manera a la recopilación y ordenación de la información que existe al respecto, todavía en forma muy dispersa.

El trabajo en sí consta de seis capítulos, cuyo contenido es el siguiente:

En el primer capítulo, se habla del proceso de erosión que tiene lugar tanto en las márgenes de los ríos como en las costas, y se señalan los problemas que se derivan en forma directa o indirecta de dicho fenómeno, destacándose la importancia que tiene la construcción de obras de protección.

En el segundo capítulo, se hace una descripción general de las obras de protección más comúnmente usadas para combatir la erosión que se desarrolla en ríos y mares, mencionándose algunas de las recomendaciones más importantes para su diseño, como el incluir un sistema filtrante en su estructura, sobre todo cuando se trata de obras de gran magnitud, para reducir los riesgos de una falla y alargar su vida útil.

El tercer capítulo se refiere por completo a los filtros de material graduado, cuyo uso es muy recorrido en las obras de control de erosión; en él se describe la utilidad que tienen no solo en éstas sino también en otras obras de ingeniería. Se mencionan además los requisitos mínimos que debe cumplir el material granular usado para su construcción, haciéndose ver la necesidad de sustituirlos por otro tipo de filtros cuando no se satisfagan dichos requisitos.

El cuarto capítulo proporciona una amplia descripción de los tejidos textiles; se habla de las materias primas usadas para su manufactura, de los diferentes tipos de telas que se obtienen según el proceso de unión de fibras, de las propiedades que presentan y que se toman en cuenta para su elección, así como de los métodos de ensayo establecidos para evaluarlas. Adicionalmente, se señalan las funciones básicas que pueden realizar y se establece una relación entre ellas y las propiedades requeridas para optimizarlas, dándose de esta manera los elementos necesarios para el diseño.

En el quinto capítulo se centra la atención en la función filtrante de los geotextiles y en la aplicación que tienen en las obras de control de erosión. Se explican con cierto detalle los criterios de diseño que se han desarrollado hasta la fecha y se examina la validez de cada uno de ellos.

Finalmente, en el sexto capítulo se habla de los resultados obtenidos en algunos de los casos en que se han utilizado geotextiles para sustituir a los filtros de material graduado en obras de control de erosión, mencionándose aspectos relativos a costo, proceso de colocación, comportamiento, vida útil y mantenimiento.

En realidad, el análisis de factibilidad se enfoca predominantemente al aspecto técnico, y en segundo término al aspecto económico, el cual se evalúa solamente en forma cualitativa.

Por otro lado, resulta pertinente consignar que las recomendaciones aquí señaladas para el diseño de filtros de geotextiles, constituyen solamente una orientación para el conocimiento y uso racional de los criterios existentes, ya que toda elección deberá ser finalmente definida con base en experimentos que confirmen la factibilidad técnica de la alternativa.

1. PROBLEMAS DE EROSION EN MARGENES DE RIOS Y COSTAS

1.1 Erosión fluvial

El proceso de erosión en los ríos se inicia con la remoción de las partículas de suelo que forman parte del fondo y las orillas. Aunque el desgaste es casi siempre mayor en el fondo, generalmente tiene mayor importancia la erosión que ocurre en las márgenes. La magnitud de esta erosión se encuentra condicionada por factores como: el tipo de suelo, la ausencia o presencia de vegetación, la velocidad de la corriente, el uso del suelo en las cercanías y aguas arriba del río, la estabilidad del cauce durante las crecientes e incluso el clima. Tal variedad de parámetros hace que el estudio de este fenómeno sea muy complejo. A veces se conjugan en forma tal que los problemas derivados son realmente serios. Por ejemplo, como cuando se ve afectada la economía de ciertas regiones por la destrucción de las tierras de cultivo que se encuentran cerca de los ríos, debido a un continuo declive de sus márgenes o a desbordamientos producidos por la obstrucción de sus cauces con el material proveniente de la erosión que tiene lugar aguas arriba.

Existen también otro tipo de problemas que afectan a obras civiles, y que igualmente se traducen en pérdidas económicas. Los puentes, y en general todas las construcciones cercanas a los ríos, resultan perjudicadas en una u otra forma por la inestabilidad de las márgenes. Asimismo, una parte considerable del material fino que se deposita en los embalses proviene de la erosión de las márgenes de los ríos. Como se sabe, este azolve reduce la capacidad de almacenamiento de las presas.

Por otro lado, el material producto de la erosión de las márgenes contribuye a la formación de depósitos como bancos de arena que constituyen obstáculos para la navegación fluvial.

1.1.1 Reducción de áreas cultivables

Entre los problemas suscitados por el desgaste de las márgenes de los ríos, figura en primer término la reducción de las tierras susceptibles de ser cultivadas. Generalmente, esta situación es más crítica en las orillas que forman la parte exterior de una curva; y se acentúa todavía más cuando hay ausencia de vegetación. Por tal razón, el pastoreo excesivo y el cruce de los lechos por el ganado puede acelerar el proceso.

Si bien se ha comprobado que a veces se forma tierra en el lado opuesto de la margen que es erosionada, no requiere de mucho tiempo para que se reemplace totalmente la tierra destruida por suelo cultivable; y además, aunque exista tal recuperación, la tierra nueva no suele ser tan buena como la destruida, obteniéndose en el peor de los casos, si se trata de bancos de arena, así que de cualquier forma se produce una pérdida de terreno.



FIG. 112(a) DESTRUCCION DE ESTRATOS DE SUELO FERTIL EN UNA DE LAS MARGENES DEL RIO A WOODS, EN VERMONT, EUA. (DER.) LA MISMA AREA, PERO PROTEGIDA MEDIANTE LA PLANTACION DE ARBUSTOS (RM. 2)

1.1.2 Inestabilidad de los márgenes

Es muy común que los márgenes de los ríos presenten derrumbes o caídos por descensos repentinos en el nivel del agua o por la socavación que produce la corriente.

En el primer caso lo que sucede es que al bajar el nivel del agua, el material que forma parte de los márgenes y que antes estaba sumergido queda saturado, lo cual aumenta las fuerzas que tienden a producir la falla del talud. Si el material es relativamente permeable se establece además un flujo descendente que genera una fuerza de filtración, la cual se suma a las fuerzas gravitacionales ya incrementadas por el peso volumétrico del agua. Esta forma de inestabilidad equivale a la falla que puede presentarse en una presa de tierra a causa de un vaciado rápido.

Por lo que respecta a la socavación, es un fenómeno que afecta la parte baja de los márgenes y, como ya se dijo, se acentúa en las curvas, por eso es que en estas zonas se registran los mayores desplazamientos. El hecho de que se produzca mayor erosión en la parte externa se debe a que, la fuerza centrífuga que adquiere el agua genera una corriente en el fondo que va del extradós hacia el intradós de la curva, la cual, al combinarse con la que sigue el río, se convierte en una corriente helicoidal que arrastra los materiales del fondo hacia la parte interior de la curva, formando un cauce más profundo en el lado opuesto. En esta parte, el agua tiende a fluir con mayor velocidad y, por el efecto de rotación de su propia masa, adquiere una mayor capacidad de arrastre, pudiendo formar taludes cada vez más escarpados, lo que después se traducirá en una serie progresiva de derrumbes y caídos (fig. 1.2).

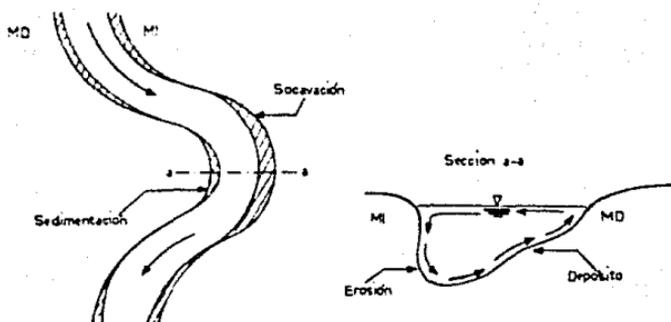


FIG.1.2 PROCESO DE EROSION EN UNA CURVA (Ref.5)

Cuando existe un proceso como éste en todas las curvas de un río su cauce se vuelve cada vez más sinuoso y toda la configuración de meandros cambia continuamente, es decir, la corriente se hace divagante.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, se recomienda que las cimentaciones de las estructuras adyacentes a la parte exterior de una curva se desplanten a una profundidad mayor que la del fondo del río, para que no puedan ser dañadas. Otra alternativa podría ser construir una protección marginal. En todo caso, conviene siempre que cualquier estructura que tenga que construirse cerca de un río se ubique sobre alguno de los tramos rectos existentes entre las curvas.

Cuando en las márgenes de los ríos existen estratos de suelo permeable confinados entre estratos impermeables, la erosión puede ser particularmente peligrosa, independientemente de que se trate o no de una curva. Si el nivel del agua se encuentra por encima del estrato permeable puede generarse una fuerza de subpresión que haga deslizar todo un bloque del material que forma la margen (fig. 1.3).

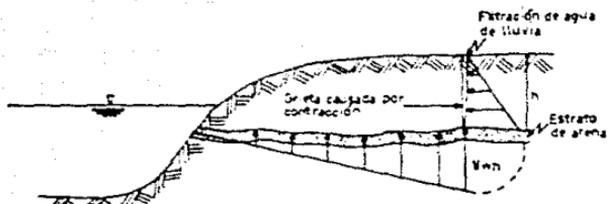


FIG. 13 MECANISMO DE DESLIZAMIENTO DEL MATERIAL QUE FORMA UNA MARGEN (Ref. 7)

Es probable también, que el agua solamente arrastre el material granular del estrato permeable y que ocurran asentamientos que causen daños severos a las estructuras construidas muy cerca de la orilla (fig. 1.4).



FIG. 14 CONSTRUCCIONES DAÑADAS POR LA SOCACION PRODUCIDA EN LA MARGEN DE UN RIO (Ref. 7)

1.1.3 Afectación de estructuras de cruce y obras adyacentes

La erosión que ocurre tanto en el fondo como en los márgenes de los ríos puede acelerarse por el paso de una avenida máxima cuando se interfiere el paso de la corriente con alguna estructura. Dada la necesidad de realizar obras que crucen corrientes de agua, es frecuente que éstas se vean afectadas por tal fenómeno. El caso más común lo representan los puentes con apoyos en el seno de una corriente.

Se distinguen tres formas principales de socavación que afectan a dichas estructuras:

- 1) General.- es aquella que ocurre independientemente de la construcción de cualquier obra, por el paso de una avenida máxima, y afecta tanto al fondo del cauce como a las márgenes.
- 2) Local.- es la que se produce alrededor de las pilas de un puente, situadas en la corriente, como consecuencia de la distorsión que causan en las líneas de flujo. Cuando alcanzan profundidades por abajo del nivel de desplante de las pilas puede causar el colapso de la estructura (Fig. 1.5).
- 3) Por estrechamiento.- es la que ocurre por el hecho de construir los terraplenes de acceso, ya que ésto causa una reducción del área hidráulica del cauce y por lo tanto un aumento de la velocidad del flujo, lo que proporciona un mayor poder erosivo al agua. Aunque esta socavación no afecta en forma tan severa la estabilidad de los puentes como la que actúa sobre sus pilas, sí puede tener un efecto nocivo sobre la parte expuesta al flujo de los terraplenes de acceso. Dicho efecto se reflejará en los daños que se pro-

duran a largo plazo en los estribos. En algunos casos podrán no ser perceptibles, pero en otros podrán traducirse en asentamientos que conduzcan a una falla de tipo funcional (fig. 1.6). Ello dependerá de que tan susceptible sea el suelo a dicha socavación y de las medidas que se tomen para evitarla.

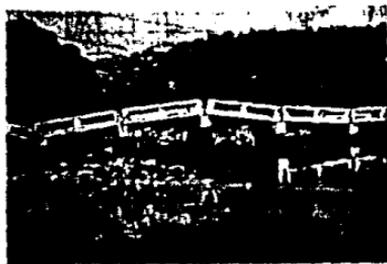


FIG. 15 PUENTE FALLADO POR SOCACION (RM. 51)



FIG. 16 UN GRAN PUENTE MOSTRANDO DEFORMACIONES POR SOCACION (RM. 51)

Así como la socavación de las márgenes puede tener efectos nocivos sobre los terraplenes de acceso de los puentes, también puede dañar a los terraplenes de las carreteras y las vías férreas - que se desarrollan paralelamente a las corrientes de agua. Al respecto señalan algunos autores que la protección de las márgenes - puede llegar a ser muy necesaria, si las vías terrestres se encuentran cerca de una curva de un río (fig. 1.7).



EFECTO DE UNA CORRIENTE FLUVIAL SOBRE EL TERRAPLEN DE UNA VÍA FÉRREA (R. G.)

1.1.4 Arrastre de materiales

El arrastre fluvial es el acarreo de materiales producto de la erosión del cauce de un río por el paso de una corriente. Una gran cantidad de estos materiales proviene de la erosión de los márgenes.

Este fenómeno ha sido objeto de muchas investigaciones y, lo que era en un principio un proceso geológico relativamente simple, se ha convertido ahora en un importante objeto de estudio al que se han dedicado análisis matemáticos muy complicados. Esto se debe al interés del ingeniero por cuantificar dicho transporte de material para poder predecir el efecto que tendrá en una determi-

nada obra, así como la forma en que podría modificarse por la realización de la misma. Por lo anterior, su estudio se considera actualmente como una importante rama de la Hidráulica.

Para determinar la cantidad de materiales que transporta un río y la regularidad de su movimiento, es necesario conocer las características de la cuenca de la cual proceden, a través de un estudio geológico que permita determinar las causas naturales o iniciales de la erosión, el grado que ha alcanzado, y probablemente el principal origen del material transportado.

En forma elemental, el arrastre de material en un río puede dividirse en dos partes: el del fondo, que consiste en un rodamiento de los fragmentos más pesados, y otro intermitente, con saltos y rebotes, de los fragmentos de tamaño un poco inferior; y el de suspensión, que se refiere al transporte de partículas más pequeñas. Existen actualmente una serie de procedimientos que permiten hacer una cuantificación teórica de este transporte de materiales. Solo para el caso de los materiales en suspensión existe una forma precisa de medición, a partir de la toma de muestras de agua.

Los efectos dañinos de este proceso realmente se manifiestan - hasta que ocurre el depósito de materiales transportados, lo cual constituye la etapa final del ciclo erosivo, de la que se hablará más adelante. Sin embargo, el propio arrastre tiene también un efecto sobre el cauce del río al momento de ocurrir. Se sabe que - este fenómeno contribuye en gran medida a la socavación del fondo ya que la acción erosiva del agua sola no es tan importante como cuando ocurre arena y grava. Ello se debe a que el material arrastrado golpea constantemente en el fondo siguiendo un movimiento irregular, lo cual produce mayor erosión.

1.1.5 Aprove de cauces y formación de depósitos

El producto de los materiales erosionados y transportados por el agua representa un gran problema para el adecuado funcionamiento hidráulico de los ríos. Los cauces de las grandes vías fluviales son reducidos y rebalsante y, si existe navegación, las embarcaciones se ven afectadas por la formación de bancos de arena (fig. 1.9).



FIG. 1.9 UN BANCO DE ARENA EN UN RÍO DE R. D. C.

A veces la acumulación de material llega a ser tal que resulta necesario efectuar operaciones de desazolve o de dragado, las cuales son muy costosas.

Los depósitos grandes también pueden desviar a las corrientes de sus cauces y hacer que se produzcan inundaciones en las tierras adyacentes, dañándose a extensas áreas de cultivo o a poblaciones enteras.

Cuando esta sedimentación se desarrolla en los vasos de almacenamiento de las presas no permite que éstas tengan un funcionamiento óptimo porque reduce, poco a poco, su capacidad. Si consi-

deramos el enorme costo que tienen estas estructuras, diseñadas para manejar un determinado volumen de agua, el problema del aacolve adquiere una importancia mucho mayor. Una vez que el material transportado ha llenado un embalse es prácticamente imposible limpiarlo y entonces se pierde no solo una estructura sino el lugar ocupado por ella ya que los sitios adecuados para construir una presa, dentro de la cuenca de un río, son pocos.

1.2 Erosión marina

La erosión generada por el mar es el resultado de la acción combinada del oleaje y las corrientes marinas, y depende de factores como: la forma de la costa, el tipo de suelo, la vegetación y el clima. Aunque la erosión marina ataca de igual forma a las costas rocosas que a las que están formadas por depósitos de arena, es en estas últimas donde más se resienten sus efectos.

Cuando en una playa la cantidad de material arrastrado es igual a la cantidad de material depositado se dice que se encuentra en estado de equilibrio, no obstante, tal situación puede verse modificada si se construye una obra de ingeniería. La alteración puede ser peligrosa para obras vecinas, para la misma playa e incluso para la obra que en sí ocasiona el desequilibrio. Es por ello que para poder prever las consecuencias de una obra de terminada se debe conocer el grado de equilibrio de la playa, el cual depende de la fase del ciclo erosivo en que se encuentre.

En el proceso de transformación de las costas se distinguen tres fases: una en la que tiene lugar la primera erosión, y otra en la que se recupera la forma original. Cuando las costas se encuentran en la primera etapa se las denomina costas "inergen-

tes", ya que resultan del descenso gradual de una costa original socavada por el mar. Estas presentan irregularidades como pequeñas bahías y valles sumergidos. Por otro lado, cuando se encuentran en la segunda etapa se les denomina costas "emergentes" por ser consecuencia de la elevación gradual del fondo del mar, debida a la acumulación de material suelto producto del arrastre de las aguas marinas. La formación de éstas comienza hasta que las costas severamente erosionadas en la primera etapa pierden sus irregularidades. Es en la transición entre una y otra etapa que se alcanza un equilibrio y la erosión tiende a regularizarse. El poder situar a la costa en estudio en alguna de las fases del proceso descrito servirá para conocer las condiciones que deberán tomarse en cuenta en el diseño de cualquier obra.

1.2.1 Destrucción de playas

La continua erosión marina de las costas formadas por material suelto (playas) frecuentemente se traduce en la pérdida de una determinada extensión de terreno. Esto perjudica los planes de aprovechamiento de dichos lugares para fines turísticos, por lo que debe hacerse todo lo posible por conservarlos.

Como ya se mencionó, la erosión tiene lugar cuando en una playa sale más material del que llega. El proceso se manifiesta como un aumento de la pendiente de la playa, lo cual hace que ésta retroceda de manera uniforme. Si bien ésa es la tendencia general, no es posible que se forme una costa recta porque algunos estratos ofrecen mayor resistencia al desgaste, lo cual dá lugar a la aparición de accidentes naturales como acantilados, peñas horadadas o islotes costeros.

Por otro lado, aunque la mayor parte de los productos de la erosión son arrastrados hacia aguas profundas, puede formarse, después de un tiempo, una pequeña playa con parte del material roto, al pie del acantilado creado.

Independientemente de como se desarrolle la erosión, será inevitable la reducción de áreas recreativas.

En la fig. 1.9 se muestra el efecto de la erosión marina sobre la línea costera en épocas de calma y tormenta.

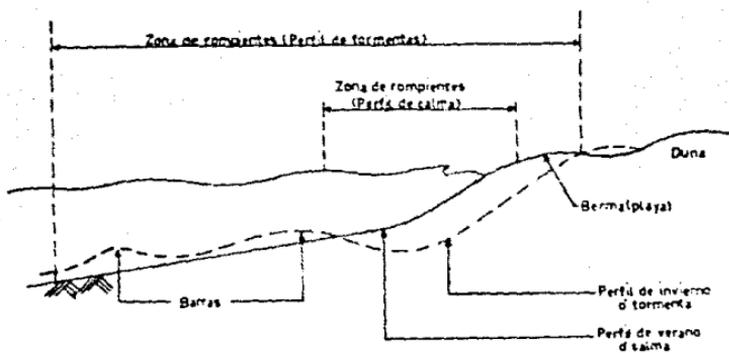


FIG. 1.9 PERFIL PLAYERO DE VERANO O CALMA Y DE INVIERNO O TORMENTA (Ref. 1)

Las obras de protección como diques o rompeolas pueden servir muy bien para combatir este problema, aunque solo retarden - sus efectos o los disminuyan, ya que es imposible detener a las fuerzas de la naturaleza que han estado por siglos.

1.2.2 Licuación inducida en sedimentos marinos

En la mecánica de suelos se entiende por licuación la pérdida, temporal o definitiva, de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo. Los suelos susceptibles de sufrirla son aquellos en los que los contactos entre los granos son relativamente escasos, o cuya relación de vacíos es mayor a la crítica.

Las causas que pueden producir la licuación de un suelo son de dos tipos:

- a) Licuación por incremento de los esfuerzos cortantes que obran en el suelo o por disminución de la resistencia a los mismos.
- b) Licuación producida por una sollicitación brusca sobre el suelo, tal como un sismo, un impacto, etc.

Este último tipo suele llamarse "licuación espontánea" cuando ocurre en arenas saturadas, por la rapidez con que tiene lugar, y es el más importante desde el punto de vista ingenieril.

Por lo general, las fallas rápidas debidas a esta forma de licuación se presentan en taludes naturales, donde el material se encuentra saturado y en estado suelto, al presentarse un efecto dinámico brusco.

Dadas las condiciones para que pueda desarrollarse dicha licuación en una masa de arena, es muy probable que ocurra en playas, formaciones litorales o sedimentos del fondo del mar (fig. 1.10).

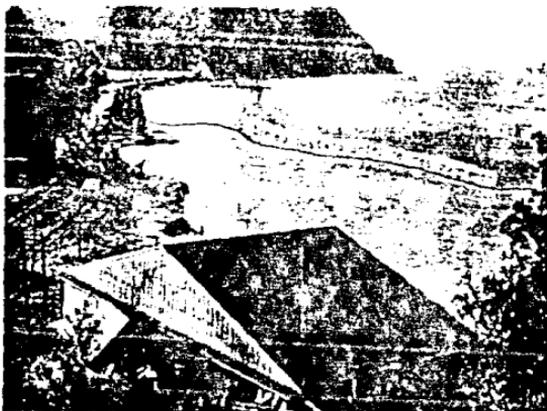


FIG. 110 MAGNITUD DE UN DESPLAZAMIENTO MARINO PRODUCIDO POR LA LICUACION INDUCIDA EN EL SUELO QUE FORMABA LA PLAYA (RM 7)

1.2.3 Afectación de obras marítimas y otras construcciones

La licuación inducida en las costas por el oleaje es un fenómeno al que recientemente se ha puesto mucho interés ya que encuentra aplicación en problemas de estabilidad de estructuras -- que se apoyan en el lecho del mar, como muros de protección, rompeolas, cimentaciones con pilotes, etc.

Al igual que en los ríos, la inestabilidad de las costas pone en peligro a las estructuras cercanas a ellas.

Cabe señalar que el solo retroceso de una playa debido al transporte litoral puede ser causa de afectaciones importantes -- en construcciones como hoteles o casas para vacacionar. Asimismo, se ven afectadas las vías terrestres cercanas a las costas.

1.2.4 Transporte litoral

El transporte litoral es un fenómeno que consiste en el movimiento de material granular producido por el mar a lo largo de grandes longitudes de costa. Se han estudiado muy bien los aspectos hidrodinámicos de este proceso y actualmente se comprende -- bien el carácter general del movimiento. Se ha demostrado que el viento tiene una gran influencia sobre él, razón por la cual se considera un factor dominante.

Al igual que el transporte fluvial, el que ocurre en los litorales se lleva a cabo por saltación, arrastre y suspensión, y similarmente al primer caso existen estudios realizados por varios autores para cuantificar el material transportado.

Es importante señalar que, cualquiera que sea el método utilizado, éste deberá calibrarse con mediciones realizadas en forma directa en el sitio de estudio.

La cuantificación del transporte litoral generalmente se requiere cuando se desea saber si se presentarán futuras zonas de depósito o erosión por construir una obra determinada y alterar el equilibrio litoral, o bien para conocer los volúmenes de materiales que pueden ser erosionados o depositados en zonas bajo estudio, durante determinados intervalos de tiempo.

En cuanto a los problemas derivados de este proceso, no se manifiestan sino hasta que ocurre el depósito.

1.2.5 Depósitos de materiales

El depósito de sedimentos debido al transporte litoral puede ocurrir en zonas bajas o frente a formaciones rocosas. Dependiendo de las características de los materiales transportados, la e-

nergía y la difracción del oleaje, y de las corrientes producidas por éste y las mareas, se pueden tener las siguientes formaciones litorales:

- a) Playas.- Son acumulaciones de sedimentos no consolidados como arena, grava, bolsons, etc., que se extienden desde el nivel de bajamar media hasta algún accidente fisiográfico, como son los acantilados o las dunas. Generalmente son rectas o tienen una curvatura cóncava hacia el mar (fig. 1.12). Estas formaciones, lejos de significar un problema, constituyen áreas potencialmente explotables.

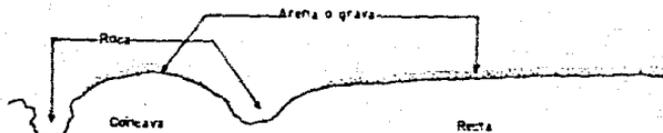


FIG.1.12 TIPOS DE PLAYAS (Ret.)

- b) Flechas.- Son depósitos que se forman en los extremos de las playas o de discontinuidades de la costa cuando existe un gran transporte litoral y las aguas son poco profundas. Se les denomina de esta forma porque su avance señala la dirección que sigue el transporte litoral (fig. 1.13). En época de estiaje pueden llegar a cerrar la desembocadura de algunos ríos, constituyendo entonces obstáculos para la navegación.

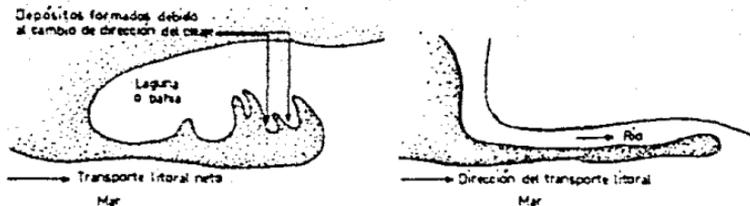


FIG. 1.13 FLECHAS FRENTE A UNA LAGUNA Y EN LA DESEMBOCADURA DE UN RÍO (Ref. 1)

- c) Barreras.- Son depósitos parecidos a las flechas que se encuentran frente a lagunas costeras, pero que no están unidos a tierra firme (fig. 1.14). Se forman a partir de una flecha que se rompe durante una tormenta.

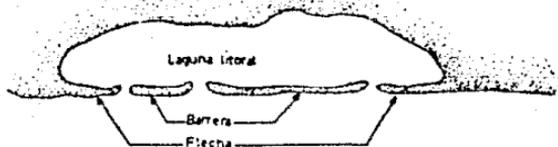


FIG. 1.14 FLECHA Y BARRERA (Ref. 1)

- d) Tómbolos.- Son franjas de material granular que se desarrollan de la costa hacia una isla u otro estribo frente a g_lie, al cual generalmente se llega a unir (fig. 1.15). Se forman a consecuencia de la difracción que sufre el oleaje al encontrarse con un estribo cercano a la playa.

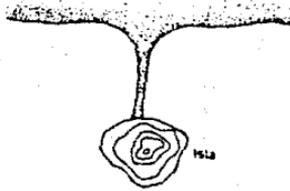


FIG. 1.15 TOMBOLO (Ref. 1)

Cuando se utilizan los espigones para la conservación y protección de las playas se propicia la formación de tómbolos por que así se aumenta el ancho y la longitud de las mismas.

- e) Playas triangulares o cuspete.- Son depósitos de forma triangular, con el vértice dentro del mar mas o menos redondeado (fig. 1.16). Representan la fase inicial de formación de un tómbolo - antes de que se empiece a formar su flecho.



FIG. 1.16 PLAYA TRIANGULAR O CUSPATE (Ref. 1)

Todas las formaciones mencionadas hasta el momento quedan por arriba del nivel de la superficie del agua, es decir, son fácilmente visibles, sin embargo, existen otras que no lo son.

f) Barras.- Son depósitos localizados en el litoral que siguen una dirección casi paralela a la costa. Dado que estos obstáculos se encuentran siempre por debajo del nivel de bajamar mínima, constituyen un peligro para la navegación de gran calado. En algunos casos pueden llegar a obstruir la desembocadura de un río o la entrada a obras de toma de centrales termoeléctricas (fig. 1.17).

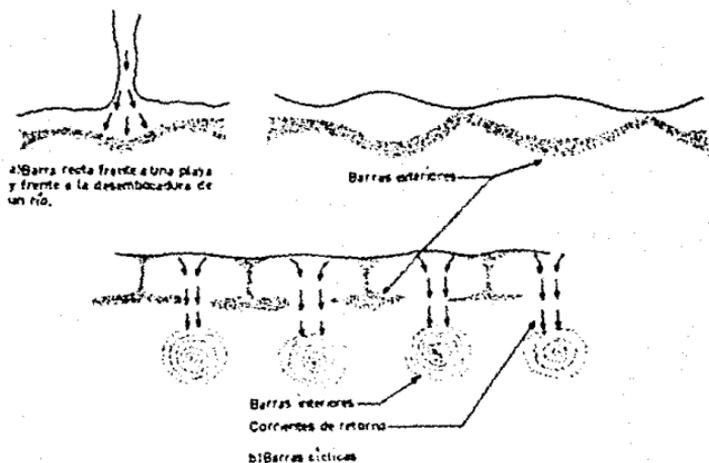


FIG.1.17 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS BARRAS (Ref. 1)

g) Bancos.- Son acumulaciones de arena, generalmente alejados de la costa y bajo la superficie del agua. Estos depósitos son más peligrosos para la navegación ya que no es fácil prever su ubicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. C.F.E., Manual de Diseño de Obras Civiles, Tomos A.2.11 (Hidráulica Fluvial) y A.2.13 (Hidráulica Marítima), Instituto de Investigaciones Eléctricas, México 1979.
2. Hammond H., Elementos de Conservación del Suelo, Trad. Carlo Gerhard, Fondo de Cultura Económica, México 1974.
3. Juarez E. y Rico A., Mecánica de Suelos, Tomo 2, Limusa, México 1979.
4. Legget R., Geología para Ingenieros, Trad. Pedro Novo, Gustavo Gili, Barcelona 1964.
5. Leonards G., Foundation Engineering, McGraw Hill, U.S.A. 1962.
6. Rico A. y Del Castillo H., La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Tomos 1 y 2, Limusa, México 1973.
7. Tschebotarioff G., Foundations Retaining and Earth Structures, McGraw Hill, U.S.A. 1979.

2. OBRAS DE PROTECCION PARA CONTROL Y PREVENCION DE LA EROSION

2.1 Obras de proteccion en los rios

Las obras que pueden realizarse para reducir o evitar la erosión que tiene lugar en las márgenes de los rios son muy variadas. La elección del tipo adecuado depende, en primer lugar, de que tan severa y continua sea la acción erosiva del agua, es decir, si llega o no a presentarse socavación y si toma mucho o poco tiempo para que se produzca, y en segundo lugar, de la importancia que tenga el fenómeno en cuanto a daños materiales y humanos.

Cuando se requiere proteger márgenes que tienen contacto con corrientes pequeñas, y cerca de las cuales existen tierras de cultivo, se pueden adoptar métodos tan sencillos y baratos como son el imprimir cierta inclinación a las orillas y plantar sobre ellas árboles de poca altura, arbustos o alguna otra vegetación adaptable.

Si se trata de rios con un cauce no tan reducido, y la socavación se desarrolla en la parte inferior de las márgenes, es necesario formar un recubrimiento con piedras al pie de los taludes, o disponer de una protección con "enhuacalado". Ambos tipos de obras son útiles para proteger áreas de cultivo y vías terrestres.

En casos difíciles y para reducir al máximo los desplazamientos laterales que se presentan en márgenes sujetas a una gran erosión puede requerirse hacer uso de muros, diques longitudinales o espigones. Estas obras, además de que representan un alto costo, requieren de un mayor cuidado en su diseño y construcción.

Con los muros se evitan por completo los desplazamientos de los márgenes, tanto en tramos rectos como en las curvas sin forzadas, sin embargo, cualquier pequeña falla en su diseño o durante la construcción puede conducir a la destrucción total al presentarse una avenida máxima. Por lo general, se usan para proteger a los terraplenes de las vías terrestres y en algunos casos a los bordes de protección contra inundaciones.

Los diques longitudinales, como su nombre lo indica, son estructuras de tierra que se construyen a lo largo de los márgenes de un río. Si bien éstos ayudan a detener los desplazamientos de las orillas, tienen como función principal evitar inundaciones en las áreas adyacentes; de modo que sirven para controlar la erosión que ocurre durante la época de crecientes, no solo en las márgenes sino en todo lo que comprende la llanura de inundación de los ríos. En realidad, los desplazamientos de las orillas no se evitan sino hasta que la erosión se extiende y llega al talud del dique que dá hacia la corriente, cediéndose así una parte de terreno a la erosión; por tal motivo, se construyen lo más cerca posible al cauce del río pero tratando al mismo tiempo que la sección formada entre ellos sea suficiente para conducir el gasto máximo esperado durante el paso de una avenida. Aunque el costo de los diques es más alto que el de los muros, su construcción se justifica cuando son muy frecuentes las inundaciones ya que en ellos se protege eficientemente a poblaciones, tierras de cultivo, vías terrestres y en general a todo tipo de construcción.

Por último, están los estribos, que aunque permiten una ligera erosión en la orilla que existe entre ellos, tienen un costo menor que el de los diques longitudinales y permiten que la -

obra en su conjunto continúe trabajando a pesar de la afecta-
ción o destrucción de algunos de ellos. Adicionalmente, el costo
de su mantenimiento disminuye con el tiempo.

Si bien el uso de espigones tiene grandes ventajas, también
presenta inconvenientes, como la reducción del área hidráulica
del cruce y el aumento de rugosidad en las orillas. Por otro lado,
no se pueden utilizar en curvas con un radio muy reducido;
si éste es menor que una vez y media el ancho de la superficie
libre del agua conviene más formar la protección con un muro en
lugar de espigones. No obstante, en muchas obras de protección
de márgenes o de rectificación de cauces conviene combinar am-
bos tipos de estructuras.

2.1.1 Protecciones marginales

Estas protecciones se construyen directamente sobre las ori-
llas de los ríos. Para colocarlas se requiere primero que las
márgenes presenten una cierta inclinación. La principal ventaja
de este tipo de protección radica en la no-disminución del área
hidráulica del cruce y en como se respeta la configuración natu-
ral de las orillas.

A continuación se describen las protecciones marginales más
comúnmente usadas:

2.1.1.a Cubiertas vegetales

Este tipo de protección resulta eficaz para reducir la fuer-
za erosiva del agua ya que causa una disminución en la veloci-
dad del flujo. Además de ser el método más barato, proporciona
a menudo un control adecuado en ríos no muy grandes; sin embar-
go, no se puede utilizar para proteger las partes bajas de las

márgenes que casi todo el tiempo quedan por abajo de la superficie del agua porque esta situación impide el desarrollo de cualquier vegetación protectora. Asimismo, no es útil en sitios particularmente vulnerables como son las curvas muy pronunciadas, en donde se presentan corrientes muy rápidas.

El tipo de vegetación que con mayor frecuencia se recomienda es la plantación de sauces con un diámetro de 10 a 15 cm. Esta protección debe recibir ciertos cuidados, pero lo más importante es evitar un pastoreo excesivo en el lugar de su colocación ya que al aparecer áreas peladas entre los árboles, podrá iniciarse la erosión, la cual provocará que los sauces pierdan su apoyo y que contribuyan, a partir de ese momento, a inducir mayor erosión en los márgenes, en lugar de prevenirla.

Cuando existe la necesidad de una protección temporal, mientras se desarrolla la plantación de árboles, se utiliza un manto compacto de matas, preferentemente de un saucedal joven, para resistir condiciones severas como la presencia de hielo, ya sea que se coloquen paralelamente a los márgenes, lo cual es muy común, o en ángulo recto con respecto a la corriente para favorecer el depósito de material fino. Generalmente, los matorrales formados requieren de un cierto anclaje mediante piedras o bloques de concreto.

2.1.1.b Enhuacalados

Esta protección se utiliza para evitar la erosión en la parte baja de los márgenes y puede consistir en una barrera de troncos de árboles o de pilotes de madera que se construye paralela a las orillas. Si la velocidad de la corriente no es mayor de 1.3 m/seg, puede hacerse uso de los troncos, anclándolos fren

te a la orilla, pero a cierta distancia, para provocar el depósi-
to del material fino arrastrado por el agua (fig. 2.1). Para el
control de la erosión en las curvas, donde se tienen veloci-
dades superiores a la indicada, los pilotes han demostrado ser --
más adecuados (fig. 2.2), aunque también se requiere de un ancla-
je, el cual puede hacerse con cables de acero.

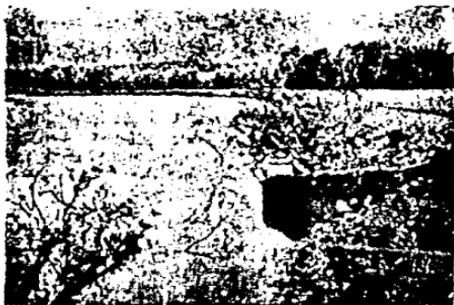


FIG. 2.1 CONTROL DE LA EROSIÓN EN LA MARGEN DE UN RÍO
MEDIANTE UNA BARRERA DE TRONCOS SITUADA PRONTE
A ELLA, DESPUÉS DE UNA PUNTA DE MAYOR INCLINACIÓN (R.M. 33)



FIG. 2.2 ESTABILIZACIÓN DE UNA MARGEN MEDIANTE UN ENJALCADO,
FORMADO CON PILOTES DE MADERA (R.M. 33)

Por supuesto que la protección con un enhuacalado puede combinarse también con el uso de cubiertas vegetales (fig. 2.3).



FIG. 2.3 MARGEN EN PROCESO DE RESANTE (ARRIBA), ESTABILIZADA (ABAJO) MEDIANTE INCLINACIÓN REGULAR Y EMPLEO DE PLETES JUNTO CON UN MANTO DE SAUCES OBTENIDOS CON UNA MALLA DE ALAMBRE (P. 3)

Para determinar que tipo de enhuacalado debe usarse en cada caso, el espaciamiento necesario entre los elementos de la barrera, la distancia y el ángulo de proyección dentro del río, se deberá tomar en cuenta el gasto máximo promedio, la pendiente del-

cauce, la velocidad máxima prevista de la corriente, las condiciones climáticas respecto a la posible presencia de hielo y la disponibilidad de uno u otro material.

2.1.1.c Pedraplenes

Para proteger la parte inferior de los márgenes se usan también los pedraplenes que, como su nombre lo indica, consisten en recubrimientos formados con piedras hasta una determinada profundidad, por debajo de la superficie del agua (fig. 2.4).



FIG. 2.4 CONTROL DE LA EROSION EN UNA MARGEN CON UN PEDRAPLEN DESPUES DE UN PERIODO DE INUNDACION RECORRIDA AL TALUD (RM, 3).

Este tipo de protección, también llamado enrocamiento, se utiliza mucho para evitar la socavación que ocurre al pie de las pilas y de los estribos de los puentes (fig. 2.5).

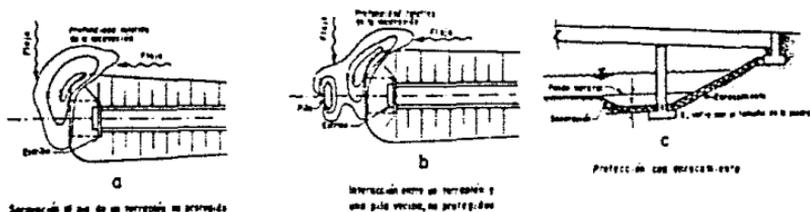


FIG.25 PROTECCION DEL TERRAPLEN DE ACCESO Y DE UNA DE LAS PILAS DE UN PUENTE MEDIANTE UN ENROCAMIENTO (Ref. 7).

Siempre debe procurarse que las piedras empleadas tengan el peso suficiente para no ser arrastradas por el agua.

Conociendo la velocidad y el tirante de la corriente así como el peso específico del material disponible, puede estimarse el diámetro mínimo que deben tener las piedras utilizadas, a partir de la tabla siguiente:

Velocidad de la corriente, U_1 , en m/s	Peso específico del material, en kgf/m^3				
	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400
1	8	8	7	6	6
1.3	15	13	12	11	10
2.0	18	16	13	13	12
2.5	27	24	21	19	18
3.0	38	34	31	25	26
3.5	53	46	42	38	35
4.0	68	60	54	50	46
4.5	86	77	69	63	58
> 4.5			85	77	70

TABLA 2.1 DIAMETRO MINIMO DE LAS PIEDRAS CON LAS QUE PUEDE FORMARSE UN PEDRALEN, PARA UN TIRANTE (d) IGUAL A 1m. CUANDO $d \neq 1m$, $U_1 = U_1 \sqrt{d}$, DONDE $U_1 = \frac{1}{2} (2 + d)$, (Ref. 7).

Deberá excavar-se lo que sea necesario para que el nivel máximo de la protección alcance la profundidad a la que llegará la socavación general. Por otro lado, al colocar las piedras, deberán formarse como mínimo tres capas con diferente gradación de tamaños para que todo el recubrimiento funcione como un filtro invertido y no permita que sea arrastrado el material fino del fondo ni de la margen protegida. Este último aspecto es un requisito doblemente importante en obras de gran magnitud puesto que de ello depende también su propia estabilidad.

Al igual que en el caso de los enhuacalados, el uso de los pedraplenes puede combinarse (y de hecho es necesario hacerlo) con el de las cubiertas vegetales (fig. 2.6).



FIG 2.6 REVESTIMIENTO DE UNA MARGEN A BASE DE PEDRAPLEN EN LA PARTE INFERIOR Y DE COBERTA VEGETAL EN LA PARTE SUPERIOR (M. 31)

2.1.1.6 Muros

Generalmente, estas estructuras se usan para proteger los taludes de terraplenes sobre los que se desarrollan vías terrestres que pueden estar sujetos durante alguna época del año al paso de una corriente. En ocasiones, se utilizan también como recubrimiento de los taludes de los bordes de protección contra inundaciones. Los materiales empleados para su construcción pueden ser piedras, gaviones, losas o piezas prefabricadas de concreto. Los procedimientos de construcción varían de acuerdo con el material utilizado, el equipo disponible y las condiciones del lugar.

Dada la magnitud de estas obras, se requiere de un mayor cuidado tanto para el diseño como para la construcción. Particularmente, es muy importante proteger de alguna forma el pie del talud o el sitio de arranque de los muros ya que es ahí donde se encuentra el principal peligro de destrucción; para ello es factible aplicar cualquiera de las dos soluciones siguientes:

- 1) En el caso de que la protección se efectue en seco, se puede hacer una zanja de 1 a 2 m de profundidad y luego rellenarla con piedras o gaviones para formar un apoyo firme. Adicionalmente puede hincarse un tablastacado. Con estas obras se evitarán deslizamientos cuando el fondo descienda durante el paso de una avenida máxima.
- 2) Otra protección puede consistir en formar un tapete de enrocamiento o pedraplén, con un ancho igual al tirante normal, pero no menor de 2 m, y un espesor de 40 a 70 cm. Si el fondo desciende durante las avenidas, las rocas que forman el tapete se acomodarán sobre el fondo socavado evitando que se deslice el muro.

Por lo anterior, es muy conveniente que los muros sean flexibles, es decir, que estén formados en su totalidad por piedras o gaviones ya que, además de ser los más sencillos de construir, en caso de ocurrir algún movimiento causado por la erosión pueden sufrir un resacodo en su estructura, sin que necesariamente fallen (fig. 2.7).



FIG. 2.7 MURO PARA LA PROTECCION DE UNA MARGEN, FORMADO POR GAVIONES.

En los muros de enrocamiento se debe procurar colocar los elementos de mayor tamaño en la parte superior para que no puedan ser arrastrados por la corriente. Por otro lado, se requiere evitar que el material fino que forma parte de las márgenes selga a través de los huecos o juntas que existen entre las piedras o elementos sueltos, lo cual se logra colocando un filtro en la parte inferior, que se forma a base de materiales pétreos debidamente graduados (fig. 2.8). Aunque esto es lo que indica la práctica tradicional, recientemente se ha ido generalizando también el uso de filtros de materiales sintéticos o bituminosos (fig. 2.9). Más adelante se hablará sobre la conveniencia de utilizar uno u otro tipo de filtro tanto en los muros como en otras obras de protección.

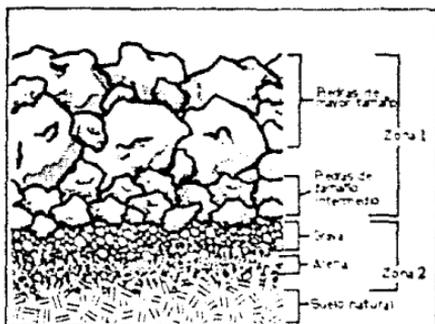


FIG. 2.8 SISTEMA FILTRANTE TRADICIONAL FORMADO A BASE DE MATERIAL GRANULAR CON DIFERENTE GRADACION (Ref. 91)

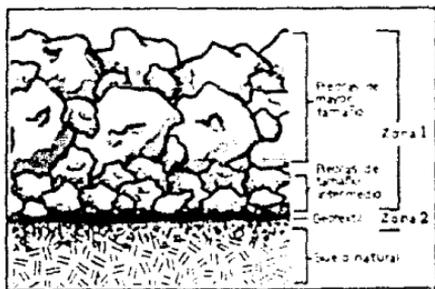


FIG. 2.9 SISTEMA FILTRANTE A BASE DE UNATELA FLEXIBLE Y PERMEABLE DE MATERIAL SINTETICO (Ref. 91)

Los muros flexibles de enrocamiento pueden formarse simplemente colocando a volteo las piedras hasta alcanzar una altura de 30 cm por arriba del nivel de aguas máximas. Por lo que respecta a los muros rígidos, como los construidos con mampostería o losas de concreto, no permiten ningún movimiento sin verse afectados. Por tal motivo, requieren de una buena compactación de la orilla en que vayan a apoyarse.

Todos los muros, ya sean rígidos o flexibles, deben estar empotrados en su parte extrema, aguas arriba, hacia adentro de la margen.

Cuando la margen de un río es muy alta, se debe construir un muro que cubra desde el fondo hasta el nivel del gasto medio de la época de avenidas. Con ésto será suficiente para evitar el retroceso de la orilla ya que la mayor erosión se produce siempre al pie de ésta. Tal vez arriba de la protección ocurra un abatimiento del talud que forma la margen, pero llegará el momento en que se estabilizará. De cualquier manera, convendrá que esta parte sea cubierta con vegetación.

2.1.2 Diques longitudinales

Los diques se utilizan cuando no sea posible apoyarse en la orilla, porque convenga construir la protección alejada de ella (para que pueda conducirse el escurrimiento que se presente durante una avenida máxima), o porque ésta sea muy irregular. En todos los casos el talud que vaya a estar en contacto con la corriente deberá ser protegido con algún tipo de cubierta.

Estas estructuras se forman con terraplenes compactados (fig. 2.10) o se hacen de mampostería con los empotramientos necesarios.

Respecto a la protección del talud expuesto a la corriente, se han probado numerosos tipos de tablestacas flexibles de diferentes materiales para absorber las variaciones iniciales en el nivel del lecho del río y también cualquier alteración causada por pequeñas erosiones posteriores en los bordes de las mismas.

Al igual que en el caso de los muros, los diques longitudinales deben contar con un sistema de filtro entre el revestimiento de protección y el talud que dá hacia la corriente, para evitar la pérdida del material fino que forma parte de la estructura, cuando éste es un terraplén (fig. 2.10).

Los diques deben estar muy bien hechos porque al disponer la gente de este tipo de protección, construirá más obras cercanas a los ríos confiando en que no podrán ser dañadas.



FIG. 2.10. PROCESO DE FORMACION DE UN DIQUE LONGITUDINAL A BASE DE UN TERRAPLEN.

2.1.3 Espigones

Los espigones son estructuras en forma de diques o pantallas interpuestas a la corriente y empotradas en la orilla en uno de sus extremos. Su colocación tiene por objeto alejar las líneas de corriente de las orillas para evitar que sean erosionadas. Los materiales con que pueden construirse son: madera (troncos o ramas de árboles), piedras, gaviones, bloques de concreto, acero y alambre, etc.

Los tipos más comunes de espigones son los formados con tablas y los de enrocamiento.

Los puntos más importantes que se deben tomar en cuenta en el diseño de una obra de protección a base de espigones son:

- a) Localización en planta
- b) Longitud (de trabajo y de empotramiento)
- c) Separación
- d) Elevación y pendiente de la corona
- e) Orientación
- f) Permeabilidad
- g) Socavación local

Sobre la forma de definirlos, puede consultarse en la referencial; solamente se menciona a continuación algo sobre la socavación local. Dicha socavación se presenta en el extremo que queda dentro de la corriente de todo tipo de espigones y llega a tener gran importancia cuando éstos se construyen con elementos sueltos (piedras o gaviones). Por tanto, es aconsejable que para evitarlo al menos se forme un recubrimiento sobre el fondo en que se apoyan, con una capa de material granular de 30 cm de espesor, o bien con algún otro tipo de cubierta artificial que funcione como filtro.

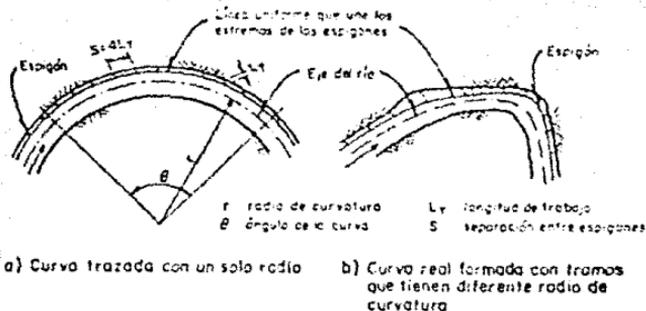


FIG. 2.11 LOCALIZACIÓN EN PLANTA DE UNA OBRA DE PROTECCIÓN CON ESPIGONES (Ref. 11)

2.2 Obras de protección costera

Todas las estructuras de protección de costas están expuestas a la acción del oleaje y el cálculo preciso de la fuerza que éste ejerce sobre ellas es muy complejo por la gran cantidad de factores que intervienen, entre los que destacan la variación del perfil del oleaje y las modificaciones que sufre por la presencia de una estructura, además de la posible formación de vórtices, la posibilidad de resonancia y la no linealidad de los desplazamientos de las partículas. Para efectuar un cálculo preciso de dicha fuerza se requiere hacer una selección de la teoría del oleaje más apropiada a cada caso.

Respecto al tipo de protecciones que pueden utilizarse, existe como en el caso de los ríos una gran variedad.

La forma de protección más simple consiste en enhuacalados formados con pilotes de madera tratada que pueda tolerar la salinidad del agua y tenga mayor duración. Si el oleaje es un poco más severo, se pueden construir barreras o cajones de tablas, techos metálicos o de concreto reforzado.

Asimismo, pueden construirse muros o diques longitudinales. Los primeros son de menor tamaño y sirven para proteger terraplenes; por su parte, los diques son estructuras masivas diseñadas especialmente para resistir la fuerza total de una ola, además de servir como una obra de defensa efectiva para evitar el retroceso de las playas. Las fuerzas que produce el oleaje sobre ambos tipos de estructuras son idénticas y su valor depende de dos condiciones: Si el oleaje rompe o no sobre la estructura y si -- parte de la ola pasa o no sobre ella.

Las obras de protección costera también comprenden un grupo de estructuras formadas por elementos sueltos, ya sea fragmentos de roca o elementos prefabricados de concreto, como son: espigones, rompeolas y escolleras. Aunque los tres tipos de estructuras sirven para evitar la erosión de las costas y su diseño es muy similar, difieren en tamaño y en el objetivo principal que se persigue con cada una de ellas.

Los espigones son muy usados para proteger a las playas contra la erosión o mantenerlas cuando éstas se forman artificialmente; por su parte, los rompeolas sirven para proteger o formar puertos; y las escolleras se utilizan para evitar el azolve de los canales de navegación en la desembocadura de los ríos, impedir la entrada de material a la obra de toma de plantas termeléctricas y proteger de la acción del oleaje a la obra de toma y a la planta de bombeo de dichas centrales.

Por lo general, estas estructuras se fortan mediante un enrocamiento protegido por piedras de gran tamaño o elementos artificiales de concreto. Todas ellas se componen de dos partes: un cuerpo y un morro; el cuerpo se inicia en la costa y continua -- hasta un poco antes del final de la estructura; el morro consti-

tuye la parte final, siendo ésta la más expuesta al oleaje por lo que en ella se colocan los elementos más pesados.

2.2.1 Estructuras paralelas a la costa

Así se les denomina porque se construyen paralelas a la orientación general de las curvas batimétricas, pudiendo estar cerca de la playa, como los revestimientos y los muros, o separadas de ella, en la zona cubierta por el agua, cuando sea necesario corregir el alineamiento de la costa o quiera ganársele terreno al mar, como es el caso de los rompeolas.

2.2.1.a Revestimientos

Estas obras consisten en un paramento inclinado, que se forma con materiales lo suficientemente resistentes para proteger un terraplén o la parte superior de una playa. De acuerdo con el desarrollo que ha tenido hasta el momento este tipo de protecciones se pueden dividir en dos grupos principales: revestimientos rígidos, como los de concreto (fig. 2.12), y revestimientos flexibles, de enrocamiento o piezas ensambladas de concreto (fig. 2.13).

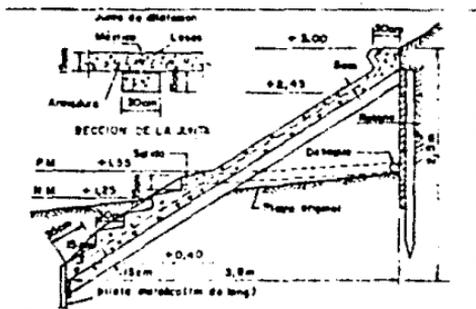


FIG. 2.12 REVESTIMIENTO DE TIPO RIGIDO (Ref. 21)

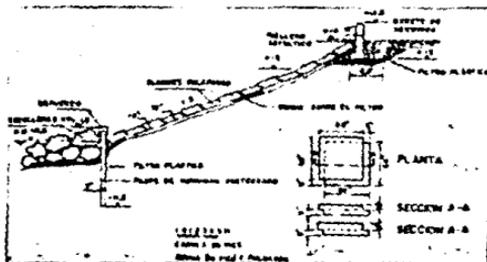


FIG. 2.13 REVESTIMIENTO FLEXIBLE FORMADO POR BLOQUES DE CONCRETO INTERCONECTADOS (R.M. 21)

Los primeros proporcionan una buena protección pero exigen ser construidos en seco. Por su parte, el tipo flexible tiene las ventajas de que puede tolerar movimientos sin pérdida de solidez y además absorber las subpresiones hidrostáticas generadas por la acción del oleaje.

El empleo de los revestimientos flexibles ha adquirido gran auge en los últimos años, sobre todo en los Estados Unidos, donde se han desarrollado una gran variedad de diseños con diferentes materiales como: piedras, asfalto, losas o bloques de concreto, gaviones, neumáticos, sacos de arena, etc.

Un aspecto muy importante en el diseño de los revestimientos es la necesidad de disponer de un sistema filtrante que no permita la pérdida del material suelto sobre el que se asientan, y evite la falla de toda la obra. Aunque generalmente se usa material granular para formar dicho filtro, también existe la alternativa de utilizar una tela elástica que sea permeable. Esta nueva práctica ha demostrado ser funcional en obras realizadas en los Estados Unidos (fig. 2.14).



FIG. 2.14 REVESTIMIENTO FLEXIBLE CONSTRUICO SOBRE UNA TELA FILTRANTE (RM 4)

2.2.1.b Muros

Si bien son estructuras que sirven para detener o prevenir la erosión de las costas, tienen como función principal la contención de los terrenos posteriores. Por lo general, se utilizan para proteger construcciones importantes que se encuentran cerca del mar.

En cuanto a los tipos de muros, básicamente existen dos categorías de clasificación: los muros propiamente dichos (seawalls, fig. 2.15) y las pantallas (bulkheads, fig. 2.16). Los primeros se utilizan en zonas expuestas a un oleaje severo, mientras que los otros se emplean casi siempre en zonas interiores o abrigadas, realizando una función casi exclusiva de contención de los terrenos posteriores.

Una de las partes más relevantes en el proceso de diseño de estas estructuras es el análisis de estabilidad que se lleva a cabo teniendo en cuenta la fuerza que ejerce el oleaje sobre el paramento exterior. Este análisis resulta complicado en muchas ocasiones por la dificultad que se tiene para cuantificar dicha fuerza, debido al gran número de factores que intervienen.

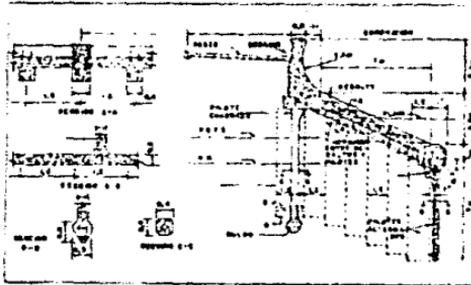


FIG.2.15 MURO RISADO CON ESCALONES Y BASTIDORES (ver. 24)

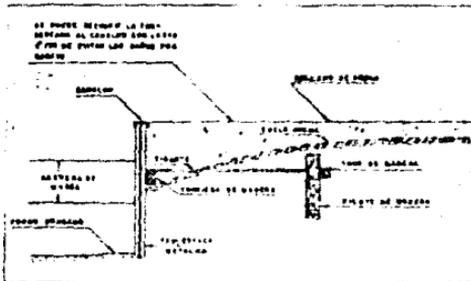


FIG.2.16 PANTALLA PARA LA CONTENCION Y PROTECCION DE TERRENOS (ver. 24)

En la referencia 1 pueden encontrarse las expresiones más usuales para determinar el valor de la fuerza de empuje cuando se trata de un muro vertical o pantalla, para las condiciones de un oleaje rompiente y no rompiente sobre la estructura, entendiéndose por ello que la profundidad del agua al pie de la misma es menor que 1.3 veces la altura de la ola incidente en el primer caso, y mayor que dicho valor en el segundo.

Aunque el paramento exterior de los muros suele ser vertical o inclinado, existen otras formas accesorias como escalones, bo taolas, oquedades, etc. La forma del paramento y el grado de ru gosidad de su superficie influyen notablemente en su poder re- flejante. Este poder está en función de la relación entre la al tura de la ola incidente y la de la ola reflejada, siendo mayor cuando la pendiente y la lisura del muro aumentan. Cabe señalar que no es deseable un alto coeficiente de reflexión ya que la - superposición de olas incidentes y reflejadas puede dar lugar a una fuerte socavación en las zonas próximas a la obra que ponga en peligro su estabilidad. A ésto se debe que sea tan socorrido el uso de muros con paramento inclinado. No obstante a veces se requiere utilizar pantallas para evitar posibles deslizamientos de tierra y entonces lo que se hace para ammorar la reflexión es reforzar al muro mediante unos pies de enrocamiento.

Los materiales de construcción más comúnmente empleados en - los muros son el concreto, las piedras y los gaviones, mientras que en las pantallas los que se usan generalmente son las ta- - blestacas de madera o metálicas y las planchas de concreto.

Según sea el material empleado, los muros pueden clasificarse en permeables e impermeables. En los primeros hay que consi- derar el uso de un filtro como el de los revestimientos, ya sea natural o sintético, que evite el paso del material fino que -- forma a la costa a través de ellos; y en los segundos será nece- sario habilitar un sistema de drenaje a base también de algún - tipo de filtro para evitar la generación de presiones hidroestá- ticas nocivas por el agua contenida en los terrenos posteriores.

2.2.1.c Diques

Los diques son estructuras masivas que se construyen con el mismo material de la costa y con las cuales se logra su sobre-elevación. Estas estructuras actúan como barreras que disipan en forma muy efectiva la energía del oleaje, evitando con ello el avance de la erosión. Generalmente, son obras de gran magnitud que requieren de la construcción de muros o revestimientos en su talud exterior. Respecto al diseño de estas obras complementarias son igualmente aplicables las recomendaciones expuestas en los incisos anteriores.

Los diques también requieren de un sistema filtrante, el cual se coloca bajo la protección del talud para evitar la pérdida del material fino que forma parte de su estructura y que puede pasar por las ranuras o huecos de los muros o los revestimientos (fig. 2.17).

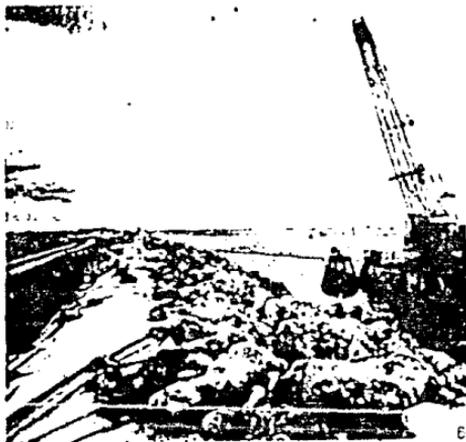


FIGURA 2.17. REVESTIMIENTO EXTERIOR DE UN DIQUE EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE EN LA COSTA DE LA BAHÍA DE SAN CARLOS, GUAYMAS, S. P. D. F.

Prácticamente se tienen las mismas recomendaciones para la construcción de los diques que para los bordos de protección contra inundaciones, solo que en este caso el terraplén debe estar mejor protegido puesto que la acción erosiva del oleaje es mucho más severa que la de las corrientes fluviales, especialmente cuando se presentan tormentas tropicales (huracanes).

2.2.1.d Rompeolas

Son estructuras que se ubican a cierta distancia de la costa, en forma paralela a ella, para absorber y disipar la energía del oleaje antes de que se acerque a ésta, y crear una zona de aguas relativamente tranquilas con el objeto de proporcionar abrigo a un acceso portuario, con fines recreativos o bien para formar un tómbolo.

Los tipos de rompeolas más usados en todo el mundo son los de talud puesto que han mostrado ser obras más seguras, que requieren un mantenimiento mínimo, y con las cuales el amortiguamiento de la energía del oleaje es casi total. Generalmente se hacen de enrocamiento y presentan una sección trapezoidal que se compone de un núcleo, formado por piedras de tamaño relativamente pequeño colocadas en forma masiva, una capa secundaria, formada por piedras de tamaño intermedio, y la coronación, que está compuesta por piedras de gran tamaño. Además de estas capas existen otros elementos, como los delantales que se construyen al pie de sus taludes o el filtro que se coloca bajo toda la estructura (fig. 2.13).

El objetivo de los delantales es proteger al rompeolas de la socavación que ocurre al pie de sus taludes, razón por la cual nunca debe evitarse su construcción. Según la experiencia, se recomienda que tengan un espesor mínimo de 50 cm y una longitud ma

por de 5m en el lado expuesto al oleaje, y entre 1,5 y 3 m en el lado protegido. Por lo general, se construyen con el mismo material del núcleo.

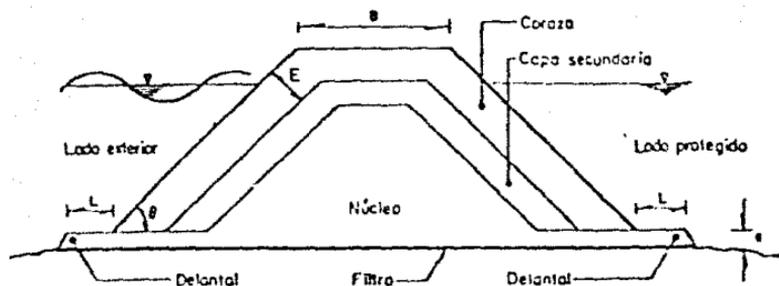


FIG. 218 SECCION TRANSVERSAL DE UN ROMPEOLAS (Rest)

Por lo que respecta al filtro de la parte superior, se utiliza para evitar el hundimiento de las piedras durante la construcción debido a las corrientes y el oleaje, y también para que la arena del fondo no sea succionada de entre los huecos de pedras — por las piedras, sobre todo cuando se presentan grandes tormentas. Con esto se reduce mucho la posibilidad de que se presenten asentamientos importantes durante la vida útil de la estructura, sin embargo, en ocasiones puede no requerirse, siendo suficiente la protección de los delantales para evitar la socavación del fondo.

En cuanto a la experiencia, este filtro será necesario todo el vez que se tenga alguna de las tres condiciones siguientes:

- a) Si en el sitio donde se va a construir la estructura las profundidades son mayores a 20 veces la altura máxima de la ola de diseño.

- b) Cuando la velocidad prevista de las corrientes sea menor - que la necesaria para desplazar al tamaño medio del material empleado en la cimentación.
- c) Cuando el fondo esté formado por un material duro, como un lecho de roca, o por un material cohesivo.

A menos que se presente alguna de estas situaciones, siempre será necesario hacer uso del filtro.

Respecto a los requisitos de gradación, en general es suficiente utilizar piedras cuyo peso varíe entre 1 y 20 kg. En cuanto al espesor de la capa que deberá formarse, dependerá de la profundidad a la cual vaya a colocarse el material y del tamaño de la piedra que se emplee, pero no podrá ser menor de 30 cm, para asegurarse de cubrir la irregularidades del fondo. Cabe señalar que también existe la alternativa de usar una tela permeable de material sintético en lugar del filtro de material granular.

2.2.2 Estructuras perpendiculares a la costa

Estas estructuras se encuentran conectadas a la costa que protegen y se localizan transversalmente a la dirección general de las curvas batimétricas.

Existen dos tipos principales de estructuras perpendiculares a la costa: las escolleras y los espigones.

2.2.2.a Escolleras

Son obras que generalmente se construyen en las desembocaduras de los ríos o en la entrada de lagunas costeras, teniendo como objetivo principal la conservación de canales de navegación y de obras de toma de centrales termoeléctricas. La forma en que lo logran es no permitiendo la formación de barras frente a tales accesos.

En realidad estas obras son muy similares a los rompeolas; aunque tienen una finalidad diferente, su estructura es idéntica. Por tal razón, las recomendaciones mencionadas para el diseño y construcción de rompeolas son también aplicables a las escolleras.

2.2.2.b Espigones

Son estructuras diseñadas especialmente para regenerar playas en vías de extinción, o bien proteger de la erosión a las que existen todavía.

Existen numerosos tipos de espigones que se pueden clasificar atendiendo a dos aspectos principales: su forma en perfil y en planta, y la clase de materiales de que están hechos.

Por su forma en perfil se dividen en: ajustables, cuando se adaptan a la pendiente de la playa, o fijos, cuando mantienen su corona a una cota constante (fig. 2.19).

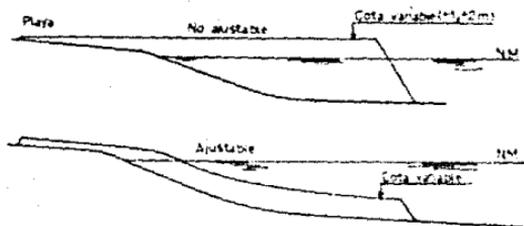


FIG. 2.19 AJUSTABILIDAD DE ESPIGONES (REF. 2)

Por su forma en planta se dividen en: simples, cuando mantienen una alineación sin ramificaciones o cambios bruscos, como los espigones rectos, oblicuos, quebrados y curvos; y compuestos cuando tienen cambios bruscos de alineación, como los que tienen forma de "T", "Y" o "L" (fig. 2.20).

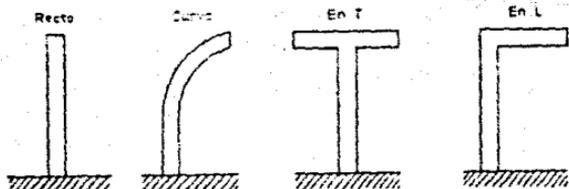


FIG. 220 FORMAS USUALES DE ESPIGONES EN PLANTA (Ref. 21)

En cuanto a su clasificación por el tipo de materiales de que están hechos, pueden ser de enrocamiento, de concreto, ya sea con elementos prefabricados o no, de acero o bien de madera.

En el diseño de los espigones de protección costera deben de finirse tres aspectos principales:

- a) Perfil-altura y longitud del espigón.
- b) Espaciamiento entre espigones.
- c) Peso de los elementos que formarán su estructura.

Sobre la forma de hacerlo, puede consultarse en la ref. 1.

Al igual que en el caso de los rompeolas y escolleras, conviene colocar en la base de los espigones un filtro, ya sea de material natural o sintético que evite el paso y movimiento ascendente de la arena del fondo; de otra forma, será muy probable que se produzcan asentamientos, sobre todo a lo largo de la zona de rellento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. C.F.E., Manual de Diseño de Obras Civiles, Tomos A.2.11 (Hidráulica Fluvial) y A.2.13 (Hidráulica Marítima), Instituto de Investigaciones Eléctricas, México 1979.
2. Corichi A., Protección de Litorales, Centro de Actualización Profesional (C.I.C.M.), México 1983.
3. Hammond H., Elementos de Conservación del Suelos, Trad. Carlo Gerhard, Fondo de Cultura Económica, México 1974.
4. Koerner R. N., Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, U. S.A. 1986.
5. Murillo B., Apuntes de clase de la materia de Ingeniería de Ríos y Costas, México 1980.
6. POLYPELT, Department Application Technique, Chemie Linz Ag, - Austria 1986.
7. Rico A. y Del Castillo H., La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Tomos 1 y 2, Limusa, México 1978.
8. S.C.T., Normas para Construcción e Instalaciones, Títulos : 3.01.02 (Estructuras y Obras de Drenaje) y 3.03.01 (Obras Marítimas), Imprecolor, México 1984.
9. SUPAC, Phillips Fibers Engineered Geotextiles, Phillips Fibers Corporation, U.S.A. 1987.
10. Tschebotarioff G., Foundations Retaining and Earth Structures, Mc.Graw Hill, U.S.A. 1979.

3. FILTROS DE MATERIAL GRADUADO

3.1 Descripción

Un filtro puede estar constituido por cualquier tipo de material poroso, sin embargo, en la Ingeniería Civil es predominante la utilización de agregados naturales, tales como grava y arena, debido fundamentalmente a que su obtención y manipulación suelen ser comparativamente baratas.

Por lo anterior se acostumbra definir a los filtros como capas o estratos de material granular que se colocan sobre formaciones de suelos compresibles o bien de rocas erosionables, ya sean naturales o artificiales, con objeto de mantener en su lugar a los materiales finos mientras se permite que el agua fluya libremente a través de ellos, lo cual constituye el propósito básico de todo filtro que consiste en permitir el paso de cualquier fluido, pero no de materia sólida.

Para asegurar una buena protección del suelo en contacto con el filtro, éste último no debe presentar espacios muy grandes en su estructura granular porque las partículas finas del suelo adyacente podrían ser arrastradas y transportadas a través de sus poros llegando a obstruir, después de un tiempo, el paso del agua. Por otro lado, si el filtro no presenta intersticios mayores que los del suelo en contacto con él, o suficientemente grandes para permitir el paso de toda el agua que fluya a través del mismo, podría ser erosionado junto con el suelo que protege.

A veces es muy difícil que un solo estrato de material granular cumpla con estos requisitos y es entonces cuando se vuelve necesario hacer uso de los filtros de material graduado, los cuales se componen de capas sucesivas de arena y grava clasificadas.

En estos filtros, el tamaño de las partículas de cada capa aumenta según se van alejando del suelo por proteger. Las primeras capas, formadas por material fino, contribuyen a la retención de partículas y las formadas por material grueso ayudan a desalojar el agua. Este funcionamiento hace que los filtros de material graduado sean especialmente útiles cuando se desea reducir al máximo las pérdidas de carga que ocurren al fluir el agua a través de su propia estructura granular, sobretodo en los casos que éstos sirven de separación entre dos tipos de suelos, uno grueso y otro fino, con una diferencia en el tamaño de sus partículas muy grande.

Si bien es cierto que los filtros de material graduado satisfacen adecuadamente los requisitos básicos para un buen funcionamiento, su construcción requiere de un mayor cuidado, tanto en la selección de materiales como en el proceso de formación. Esto hace que su costo se eleve y que por tanto disminuyan las ventajas de utilizar materiales naturales, lo cual dá cabida a otras alternativas como el uso de telas elaboradas a partir de fibras sintéticas (geotextiles), de las que se hablará más adelante.

3.2 Aplicaciones

En general todos los filtros tienen por objeto controlar o canalizar el flujo de agua del interior de una estructura de tierra, natural o artificial, hacia el exterior, para evitar la generación de presiones hidrostáticas muy grandes, así como el arrastre de las partículas finas que forman parte de ellas, ya que ambas cosas pueden afectar su estabilidad.

En muchas obras importantes, los filtros más apropiados para lograr tales propósitos han sido los de material graduado, no obstante las implicaciones de su alto costo.

A continuación se exponen algunos casos en los que podría requerirse el uso de estos filtros, y en los que resultaría factible a la vez la utilización de aquellos formados por materiales sintéticos.

3.2.1 Subdrenaje en vías terrestres

En la construcción de carreteras y vías férreas frecuentemente es necesario realizar obras de subdrenaje para desalojar el agua de los suelos o rocas sobre los que se desarrollan, así como también de los que se utilizan para la propia construcción, o la formación de terraplenes.

El drenaje en las rocas puede lograrse permitiendo simplemente que el agua fluya a través de ellos y salga libremente a zonas abiertas, tales como pozos o túneles diseñados para captar el agua desalojada. Esto será posible siempre que se trate de formaciones rocosas sanas en las que no se puedan generar presiones nocivas. Si se trata de suelos o rocas muy intemperizadas no se puede permitir un flujo libre a través de ellos puesto que podrían presentarse problemas muy serios de erosión interna y tubificación. Por ello es que en estos casos debe colocarse una protección en la superficie con la que no se impida dicho flujo pero que se logre retener a las partículas que forman el suelo.

Las protecciones comúnmente usadas en las vías terrestres para permitir el paso libre del agua de un suelo hacia el exterior son los filtros de material granular. En ocasiones, no obs

tante las recomendaciones en contrario, se requiere que estos - cuenten con más de una capa, es decir, que sean filtros de ma- terial graduado.

En realidad, son muchas las obras en las que se usan los fil- tros granulares. Algunas de las más comunes son: los subdrenes longitudinales y transversales, las capas de transición o capas rompedoras de capilaridad, las trincheras estabilizadoras, etc. De éstas, las que pueden ejemplificar mejor la utilidad de los filtros son los subdrenes. La finalidad que ellos tienen es fa- cilitar la canalización del agua acumulada en un terraplén ha- cia tuberías perforadas que la conducen a zanjas o pozos dis- puestos para desalojarla. Los filtros se colocan alrededor de - las tuberías formando una transición entre éstas y el suelo dre- nado. Si la cantidad de agua por ser descargada es relativamen- te pequeña, puede ser suficiente contar con un filtro granular de una sola capa, compuesto por materiales limpios cuidadosamen- te seleccionados; pero si se requiere mover cantidades conside- rables es necesario, casi siempre, hacer uso de filtros multicapa o bien de algún otro tipo con una eficiencia similar, como tal vez lo son las telas formadas de fibras sintéticas (figs. - 3.1.a y 3.1.b).

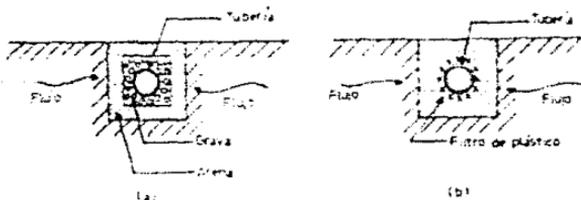


FIG. 3.1 (a) SUBDREN FORMADO CON FILTRO DE MATERIAL GRADUADO
(b) SUBDREN FORMADO CON UNA TELA FILTRANTE (Ret. 4)

3.2.2 Drenaje en muros de retención

En todos los muros de retención es necesario desalojar el agua de su parte posterior, es decir, de la zona del relleno, para evitar la generación de presiones hidrostáticas nocivas que incrementen la fuerza de empuje actuante y produzcan que éstos fallen.

En la fig. 3.2 se muestran diferentes formas de permitir el drenaje, en grado ascendente de complicación, hasta llegar a los métodos que modifican, incluso, la forma de la red de flujo en el material de relleno.

Cada sistema de drenaje se asocia a determinadas características del suelo que forma al relleno.

Si se trata de muros con una altura relativamente baja, el drenaje puede lograrse simplemente dejando pequeños conductos transversales en su estructura por los que pueda salir el agua (caso "a"). Este sistema será útil siempre y cuando el relleno no esté formado por un material impermeable, que impida un rápido desalojo del agua, o por uno demasiado permeable, con el que pueda producirse erosión al pie del muro.

El sistema mostrado en el caso "b" tampoco es recomendable en suelos finos debido a que las bolsas de material permeable son susceptibles de contaminarse, e incluso pueden llegar a taparse, obstruyendo el paso del agua.

El caso "c" consiste en un dren horizontal que une las entradas de los conductos que atraviesan al muro y que descarga lateralmente hacia ellos. Este dispositivo funciona mejor que los anteriores.

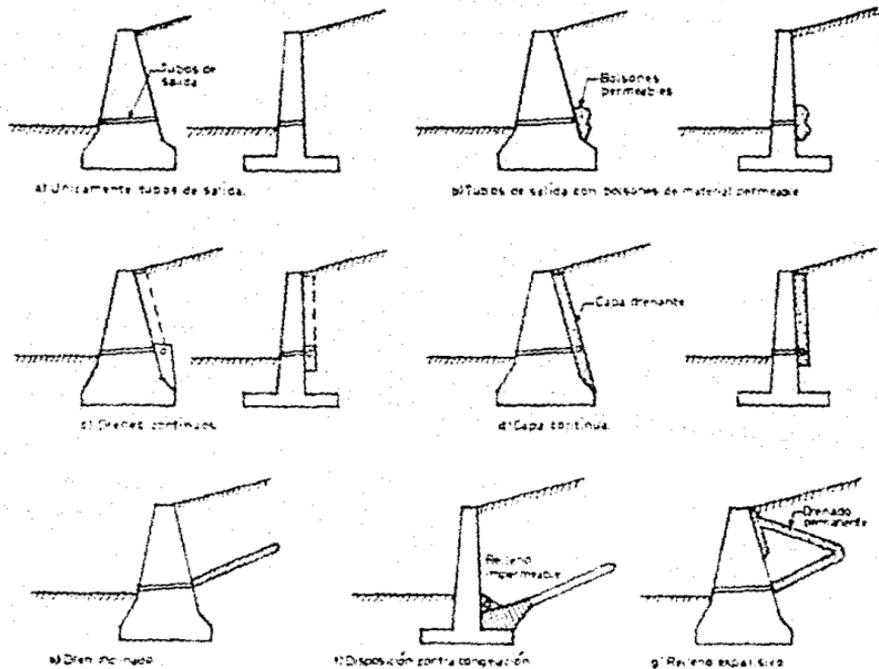


FIG. 32 DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAJE EN MUROS DE RETENCIÓN (Véase 1.1)

El sistema correspondiente al caso "d" es el más común y, por lo general, el más eficiente. En este caso, el dren horizontal se amplía para formar una cata que cubra todo el resaldo del muro. Esto hace que el agua fluya con mayor rapidez hacia los conductos de salida. El mismo sistema puede ser más eficiente todavía si el material granular adosado a la parte posterior del muro se coloca por capas, es decir, si se forma con él un filtro de material graduado, porque con ello se reducen al máximo las pérdidas de energía, y el flujo es más estable.

Lo anterior puede explicarse de la siguiente manera:

En la capa adyacente al relleno (la de menor permeabilidad), apenas se permite el paso del agua, pero se retiene a las partículas finas; en las siguientes capas, el agua puede circular con mayor libertad debido a que son cada vez más permeables; y en la capa que se encuentra en contacto con el muro, el escurrimiento se dirige rápidamente hacia los drenes o tubos de salida.

Los incisos "e", "f" y "g" de la figura muestran sistemas de drenaje más complicados que se usan solamente cuando es absolutamente necesario impedir el paso del agua al material de relleno que está en contacto directo con el muro.

Como en el caso de los subdrenes, cuando en los muros se requiere de filtros de material graduado, cabe también la posibilidad de usar telas filtrantes.

3.2.3 Control del flujo de agua en presas de tierra y enrocamiento

El agua que fluye a través de la cortina de una presa de material homogéneo ejerce sobre las partículas de este cuerpo poroso una fuerza de arrastre. El suelo resiste esta acción, por una --

parte, debido a la fuerza de cohesión entre las partículas y, - por otra, gracias al soporte que a cada partícula le brindan las que se encuentran aguas abajo de ella. Sin embargo, las partículas localizadas sobre la superficie de salida del flujo, en el talud de aguas abajo, sí pueden ser removidas de su sitio.

Una vez iniciado el proceso de erosión en el lado de aguas a bajo de la presa, (en el talud o en el material de apoyo de la cortina) éste puede progresar hacia el embalse en la forma de - un tubo o conducto (fig. 3.3).

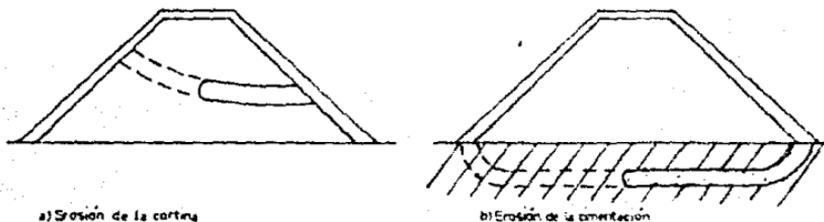


FIG. 3.3 PROCESO DE EROSIÓN REGRESIVA QUE CONDUCE A LA TUBIFICACIÓN (Ref. 6)

Al avanzar el proceso, se generan concentraciones de flujo y gradientes hidráulicos cada vez mayores en el extremo de aguas arriba del conducto, hasta que, al llegar a las proximidades del embalse, se crea una vía continua para el agua y la falla de la presa es inminente. A este fenómeno se le denomina "tubificación".

La solución a dicho problema consiste en formar una barrera de arcilla en el núcleo de la cortina y/o interceptar con drenes o trincheras al flujo que pudiera traspasar al material fino (fig. 3.4).

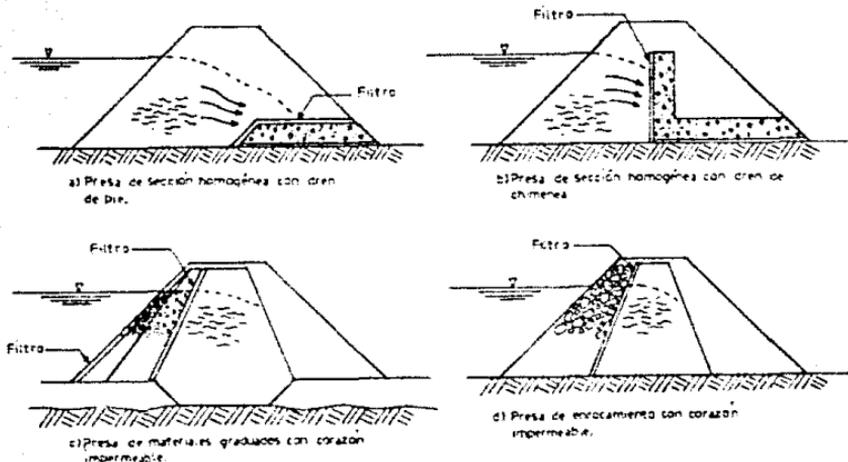


FIG. 14 DIFERENTES FORMAS DE PROTECCIÓN DE LAS PRESAS CONTRA LA TUBIFICACIÓN (Ref. 6.1)

Para la instalación de tales protecciones es necesario interno ner, entre el material fino y el grueso, una transición con otro ma terial de granulometría intermedia que actúe como filtro e impida la fuga de finos.

Generalmente, la diferencia entre el tamaño de los materiales que están en contacto es tan grande que un solo material de transición no llena los requisitos necesarios, pues o es tan grueso — que los finos aún pasan a través de él, o tan fino que es éste el que se fuga a través del material grueso. De por ello que los fil tros más empleados en las presas son los de material graduado, — formados por dos o tres capas, cuyas partículas con más gruesas, — según queden más cerca del material de mayor tamaño.

Cabe señalar que aún en obras tan importantes como éstas es válido también considerar el uso de telas filtrantes en lugar de filtros granulares multicapas.

3.2.4 Obras para la prevención y el control de la erosión en márgenes de ríos y costas

Como se vió en el primer capítulo, todas las obras de control de erosión, ya sean fluviales o marítimas, se encuentran expuestas al efecto dinámico de las corrientes y/o el oleaje. La forma en que éstas fuerzas actúan sobre las estructuras es socavando el terreno natural que les sirve de apoyo o erosionando su propio cuerpo, cuando se trata de estructuras masivas. Por otro lado, de acuerdo con lo expuesto en el segundo capítulo, una de las recomendaciones más importantes para el diseño de estas obras consiste precisamente en evitar tales situaciones, mediante la incorporación de un sistema filtrante que no permita la pérdida de material fino, y a la vez sirva para disipar las presiones hidrostáticas que puedan generarse en las partes superior e inferior de las estructuras, las cuales corren en peligro su estabilidad.

Los filtros que generalmente se usan en las obras de control de erosión son los de material enredado, ya que solamente con ellos se forma una transición adecuada entre el suelo por proteger y el material enlaidado para la construcción de la obra protectora o coraza; no obstante, recientemente se ha generalizado también el uso de telas filtrantes o geotextiles, y ahora ambas alternativas parecen tener la misma posibilidad de aplicación.

3.3 Requisitos esenciales

Todos los filtros granulares deben satisfacer dos requisitos que parecen contradictorios:

- 1) Los espacios formados entre sus partículas deben ser suficientemente pequeños para evitar que el material fino del suelo protegido pase através de ellos y ocurra una erosión interna.
- 2) Los mismos espacios deben ser suficientemente grandes para obtener una permeabilidad adecuada, que permita que el agua fluya rápidamente hacia el exterior, sin que se generen grandes presiones de poro.

Se deduce entonces que para cumplir con ambos requisitos es necesario atender a las características granulométricas del suelo por proteger, para en función de ellas determinar las que debe presentar el filtro granular.

3.4 Criterios de diseño

El primer intento de diseño racional de un filtro fue realizado por K. Terzaghi, hace ya mucho tiempo. En épocas más recientes, Bertram realizó experimentos muy completos en la Universidad de Harvard, con arenas uniformes, a fin de comprobar la eficiencia de diferentes tipos de filtros; sus estudios fueron posteriormente confirmados y extendidos por trabajos del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y por el Bureau of Reclamation en el mismo país.

A continuación, se exponen las recomendaciones que se han derivado de todos los estudios realizados hasta la fecha.

3.4.1 Recomendación para evitar la tubificación

De acuerdo con la experiencia, se considera que un suelo, a través del cual exista un flujo de agua, queda debidamente protegido contra la tubificación si se coloca un filtro con el que se impida el arrastre de cuando menos el 35%, en peso, de las partículas que lo forman, siendo tolerable que los vacíos formados entre las partículas del filtro tengan un tamaño mayor que el 15% de las partículas de dicho suelo.

Teniendo en cuenta lo anterior, Terzaghi obtuvo la siguiente relación empírica:

$$D_{15} \text{ del filtro} < (4 \text{ ó } 5) D_{35} \text{ del suelo protegido} \dots (\text{Ec. 3.1})$$

O bien,

$$\frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{35} \text{ del suelo protegido}} < 4 \text{ ó } 5 \dots (\text{Ec. 3.1}')$$

donde,

D_{15} del filtro es el diámetro correspondiente al tamaño de la abertura de la malla para cribado, a través de la cual puede pasar solamente el 15%, en peso, de las partículas del filtro.

D_{35} del suelo protegido es el diámetro que corresponde al tamaño de la abertura de la malla para cribado, a través de la cual puede pasar el 35%, en peso, de las partículas que forman al suelo protegido.

Ello significa que para limitar en un grado aceptable el tamaño de los espacios que se forman en la estructura del filtro, se requiere que el tamaño mínimo del 35% de sus partículas sea 4 ó 5 veces menor que el máximo tamaño del mismo porcentaje de partículas en el suelo por proteger.

3.4.2 Recomendación para obtener una permeabilidad adecuada

Dada la importancia de poder asegurar la estabilidad de una obra, es deseable que los filtros sean, por lo menos, 20 veces más permeables que el suelo por proteger.

Según Terzaghi, es posible garantizar que la permeabilidad del filtro sea del orden de 100 veces mayor que la del suelo por proteger, si se verifica la siguiente desigualdad:

$$D_{15} \text{ del filtro} > (4 \text{ ó } 5) D_{15} \text{ del suelo protegido} \dots (\text{Ec. 3.2})$$

O también,

$$\frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{15} \text{ del suelo protegido}} > 4 \text{ ó } 5 \dots (\text{Ec. 3.2'})$$

donde,

D_{15} del filtro y D_{15} del suelo protegido tienen un significado enteramente similar al indicado en el inciso anterior.

En esta expresión se establece que el tamaño mínimo del 85% de las partículas del filtro debe ser 4 ó 5 veces más grande que el tamaño mínimo del mismo porcentaje de partículas en el suelo por proteger.

3.4.3 Recomendaciones adicionales

A raíz de investigaciones posteriores, realizadas por instituciones como el Cuerpo de Ingenieros y el Bureau of Reclamation, las recomendaciones originales propuestas por Terzaghi se han ido afinando; asimismo, se han establecido otras que las complementan.

Con las verificaciones efectuadas por el Cuerpo de Ingenieros se encontró que es mejor usar el número 5 en las expresiones propuestas por Terzaghi. Por otro lado, se determinó que la relación entre el D_{15} del filtro y el D_{15} del suelo protegido debe tener un límite superior, estableciéndose así el número 40. Considerando ambas modificaciones las recomendaciones actuales son:

$$\frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{35} \text{ del suelo protegido}} < 5 \quad \dots \text{ (Ec. 3.3)}$$

$$5 < \frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{15} \text{ del suelo protegido}} < 40 \quad \dots \text{ (Ec. 3.4)}$$

La misma institución proporcionó una recomendación adicional para prevenir la migración de partículas del suelo protegido hacia el filtro, y que éste se sabe:

$$\frac{D_{50} \text{ del filtro}}{D_{50} \text{ del suelo protegido}} \leq 25 \text{ ó } 7 \dots \text{ (Ec. 3.5)}$$

El número 25 se aplica cuando el material del filtro está bien graduado y el número 7 cuando presenta una granulometría uniforme.

Por su parte, el Bureau of Reclamation recomienda que las curvas granulométricas de los materiales del filtro y del suelo por proteger sean sensiblemente paralelas, lo cual es una condición equivalente a la norma adicional establecida por el Cuerpo de Ingenieros.

Como una recomendación más, debida a otros investigadores, se aconseja que cuando el material por proteger contenga grava en abundancia se considere, para la aplicación de las expresiones en

teriores, la curva granulométrica que corresponda solamente a la fracción de material con un tamaño menor a 2.5 cm (1").

Cuando el suelo por proteger esté formado por materiales cohesivos será útil considerar dos requisitos más en el material granular del filtro:

D_{15} del filtro < 0.4 mm ... (Ec. 3.6)

C_u del filtro > 20 ... (Ec. 3.7)

Con C_u = Coeficiente de uniformidad.

Respecto a la posible presencia de finos en el material del filtro, es también una condición muy importante que éste no contenga un porcentaje mayor al 5%.

Es importante señalar que todas las recomendaciones mencionadas están enfocadas al diseño de filtros de una sola capa, sin embargo, son igualmente aplicables al diseño de aquellos formados por varias capas; solamente hay que verificar que cada una de éstas satisfaga los mismos requisitos con respecto a la capa precedente, como si se tratara cada vez de proteger un suelo distinto.

Por lo que se refiere al espesor de las capas que componen a un filtro, aunque teóricamente podría ser muy pequeño, existen espesores mínimos que deben manejarse por facilidad de construcción. Así, si las capas son horizontales, el espesor mínimo para arena es de 15 cm y de 30 cm para grava. En estratos verticales o inclinados, los espesores son mucho mayores y 1 m es un número que se menciona con frecuencia.

3.4.4 Diseño a partir del tamaño promedio de poros

Es fácil visualizar que son realmente los espacios vacíos que se forman en la estructura de los filtros los que determinan la capacidad de éstos tanto para retener a las partículas como para conducir el agua. La razón por la que se dan las recomendaciones de diseño en función del tamaño de las partículas que los forman, es porque resulta más sencillo y confiable, hasta cierto punto, manejar las características granulométricas del suelo, y suponer en forma implícita un tamaño promedio de poros a partir de ellas. Este proceder se encuentra además apoyado en un sinnúmero de experimentos sobre filtración, que se han realizado tomando como medida de referencia la granulometría de los suelos involucrados.

Existe sin embargo, la posibilidad de efectuar el diseño definiendo primero el tamaño promedio de los poros que se requiere en el filtro, y eligiendo después al material que cumpla con dicho requisito. Para ello es necesario contar con una expresión que permita valorar en forma confiable dicha característica en diferentes tipos de suelos, con una determinada distribución granulométrica. Actualmente existen algunas expresiones que se basan en una formulación estadística de arreglos de partículas esféricas del mismo tamaño.

El primer intento para determinar el tamaño promedio de los poros en un material granular lo realizó Atterberg, quien basó su trabajo en los experimentos que llevó a cabo con arreglos muy densos de partículas esféricas.

Para suelos granulares uniformes, Atterberg sugirió la siguiente expresión:

$$d_p = 0.2 \times D_{10} \quad \dots \text{(Ec. 3.8)}$$

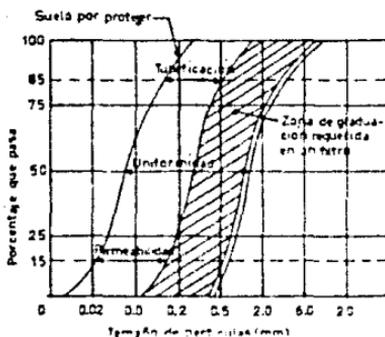
donde,

d_p = Diámetro promedio de los poros del material granular.

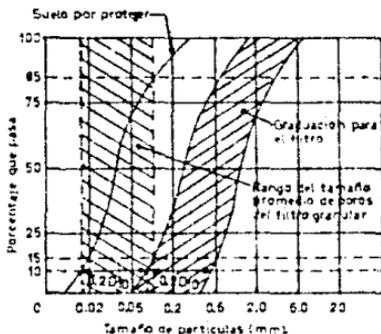
D_{10} = Diámetro correspondiente al tamaño de la abertura de la malla para cribado a través de la cual puede pasar solamente el 10%, en peso, de las partículas del material granular.

Una investigación posterior, realizada por Bailey, también con arreglos densos de partículas esféricas, dió validez en la mayoría de los casos a los descubrimientos de Atterberg.

La validez de la Ec. 3.3 puede mostrarse en forma gráfica para un suelo con una determinada distribución granulométrica. Por ejemplo, si ésta se aplica al filtro granular de la fig. 3.5 (a), su tamaño promedio de poros puede determinarse fácilmente, tal como se muestra en la fig. 3.5 (b).



a) Representación gráfica de los requerimientos generados para un filtro granular.



b) Rango del tamaño promedio de poros generado por la zona de gradación requerida en un filtro granular.

FIG. 3.5 REQUERIMIENTOS DE GRADACION PARA UN FILTRO GRANULAR DISEÑADO DEACUERDO CON EL CRITERIO GENERAL Y TAMAÑOS PROMEDIO DE POROS RESULTANTES (Ref. 5).

En el ejemplo mostrado, las recomendaciones generales para el diseño de un filtro granular, referentes a la graduación de sus partículas, resientemente aseguran solamente que éste presente el tamaño promedio de poros que previene la tubificación y facilita el drenaje en el suelo protegido.

Además de la relación de Atterberg se han desarrollado otras más complejas, que consideran también partículas esféricas, y que toman en cuenta, además de la densidad del arreglo, el coeficiente de uniformidad de las partículas.

Wittman, mediante el uso de un modelo estadístico de partículas esféricas, graduaciones diferentes y arreglos de densidades variables, encontró diámetros promedio de poros que satisfacen en forma aproximada la ecuación empírica:

$$d_p = 0.455 e D_{17} (C_u)^{1/6} \quad \dots \text{(Ec. 3.9)}$$

donde,

e = Relación de vacíos

C_u = Coeficiente de uniformidad

Si con las expresiones anteriores es posible calcular los tamaños promedio de poros que satisfacen los requisitos de diseño para los filtros granulares, es lógico asumir que también pueden usarse para obtener los tamaños promedio de poros requeridos en otros materiales que igualmente sirven o funcionan como filtros, como son los geotextiles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Chamorro V.M., Serie de Ejercicios de Geotecnia III, UNAM (Facultad de Ingeniería), México 1968.
2. Graux D., Fundamentos de Mecánica del Suelo, Proyecto de Muros y Cimentaciones, Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1975.
3. Juarez E. y Rico A., Mecánica de Suelos, Tomos 1 y 2, Limusa, México 1979.
4. Koerner H.K., Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, U.S.A. 1986.
5. Lawson C.R., Filter Criteria for Geotextiles: Relevance and Use, Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE), Vol 108, No. 10, U.S.A. 1982.
6. Marsal y Rosendiz, Fresas de Tierra y Enrocamiento, Limusa, México 1975.
7. Rico A. y Del Castillo M., La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Tomos 1 y 2, México 1978.
8. Terzaghi K. y Peck R. B., Mecánica de Suelos en la Ingeniería - Práctica, John Wiley and son, U.S.A. 1958.
9. Winterkorn H.P. y Fang H., Foundation Engineering Handbook, Litton Educational Publishing, U.S.A. 1975.

4. LOS GEOTEXILES, SUS PROPIEDADES Y FUNCIONES

4.1 Descripción

Existe tal diversidad de geotextiles en la actualidad que resulta difícil dar una sola definición que sea sencilla, sin embargo, puede decirse que son polímeros a los que se les ha dado forma de telas flexibles y porosas, las cuales encuentran aplicación en la geotecnia.

El término "geotextil" fue propuesto por primera vez por el Dr. Jean Pierre Giroud, durante una conferencia sobre el uso de telas sintéticas en la geotecnia que tuvo lugar en París, Francia, en el año de 1977; poco después fue adoptado como nombre oficial para estos materiales en la Sociedad Americana de Ensayes y Materiales (ASTM).

De acuerdo con dicha institución, un geotextil se define como:

"Cualquier material textil permeable usado en combinación con cimentaciones, suelos, rocas, tierra u otro elemento que tenga que ver con la geotecnia, el cual constituya una parte integral de un proyecto, estructura o sistema creados por el hombre".

En la práctica, los geotextiles han sido conocidos como telas, telas filtrantes, telas geotécnicas, telas para ingeniería o telas para construcción.

4.1.1 Materias primas

Es importante saber de que material están hechos los geotextiles porque con ello se puede tener una idea de su resistencia al intemperismo.

Los polímeros más comúnmente usados para obtener las fibras - con las que se fabrican los geotextiles son:

- a) Polipropileno
- b) Poliéster
- c) Nylon

El polipropileno forma parte de la familia de las poliolefi-- nas, la cual tiene una relación directa con los productos obteni-- dos de la destilación del petróleo. La característica principal de esta familia de polímeros es una total insensibilidad a los - productos químicos, en débiles y medianas concentraciones, sin - embargo, presentan una deformabilidad importante y son fácilmen-- te inflamables.

El poliéster pertenece a otra familia de polímeros, los cua-- les se caracterizan por tener un valor grande de módulo de elas-- ticidad, y por ser poco sensibles a la deformación. Tal comporta-- miento no se ve afectado aunque se les somete a altas temperatu-- ras. Respecto a sus propiedades químicas, son poco sensibles a - los disolventes, al agua de mar y a los ácidos, pero pueden su-- frir alteraciones en su estructura por la acción de productos - básicos cuyo PH sea superior a 11. Se les califica como difícil-- mente inflamables, aunque sí se quemar haciendo llama y producen-- do gotitas incandescentes autoextinguibles.

Por su parte, el nylon fue el primer material plástico enteram-- ente sintético e hilable. Este polímero pertenece a la familia de las poliamidas, la cual es muy grande, sin embargo, en la in-- dustria textil solamente se hace uso de los derivados lineales, es decir, de aquellos productos susceptibles de ser hilados. La - resistencia a la abrasión que presentan estos materiales es muy

elevada, no obstante, son sensibles a medios acuosos; después de una estancia prolongada de una tela de nylon en agua o en un ambiente húmedo, se reduce su resistencia a la tensión en un porcentaje que varía de 20 a 30 %. Este polímero es difícilmente inflamable.

Cabe señalar que los tres tipos de polímeros son sensibles a la luz ultravioleta; si se exponen mucho tiempo a los rayos solares pueden sufrir una rápida degradación y ver disminuida su resistencia en porcentajes considerables.

A fin de hacer más objetiva la comparación entre los tres tipos de polímeros, en la tabla 4.1 se proporciona un resumen de sus características más importantes.

PROPIEDAD	POLIPROPILENO	POLIESTER	NYLON
Peso volumétrico (Kg/cm ³)	900	1380	1140
Módulo elástico (Kg/cm ²)	17500	200000	40000
Resistencia a tensión (Kg/cm ²)	380	15	15
Deformación máxima (%)	155	260	250
Resistencia* a principales agentes del intemperismo:			
1) Micro-organismos	Buena	Buena	Buena
2) Ácidos	Buena	Muy buena	Buena
3) Bases	Muy buena	Buena	Buena
4) Oxidos	Buena	Muy buena	Buena
5) Rayos ultravioleta	Buena	Muy buena	Muy buena

TABLA 4.1 PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE LOS GEOTÉXTILES (Ref. 3)

(*) La escala adoptada es solamente una medida relativa, derivada de la comparación entre una y otra tela.

4.1.2 Elementos constitutivos

Los elementos básicos de un geotextil son sus fibras, las cuales pueden ser de tres tipos: filamentos, fibras cortas o cintas.

Los filamentos se obtienen directamente del proceso de extrusión del polímero, el cual se lleva a cabo en una máquina hiladora. Como se trata de un proceso continuo, los filamentos fabricados de esta forma suelen llamarse filamentos continuos. Después de la extrusión, estas fibras se tensan para lograr que sus moléculas se orienten en una sola dirección, y adquieran una mayor resistencia.

Las fibras cortas se obtienen al dividir los filamentos en tramos de longitudes pequeñas, usualmente de 2 a 15 cm.

Las cintas son pequeñas tiras de película plástica, con un ancho de 1 a 3 mm. Estas también se someten a un estiramiento después de ser cortadas.

Para fabricar las telas puede hacerse uso de las fibras como talet, o bien emplear los hilos que se forman con ellas, a saber:

- 1) Hilo monofilamento. Esta formado por un solo filamento continuo.
- 2) Hilo multifilamento. Se compone de varios filamentos continuos alineados conjuntamente.
- 3) Hilo tejido. Constituido por fibras cortas entrelazadas y torcidas conjuntamente.
- 4) Hilo-cinta. Formado por una sola tira de película plástica.
- 5) Hilo fibrilado. Compuesto por una cinta cortada y dividida en tiras fibrosas.

4.1.3 Tipos de geotextiles

Los geotextiles se clasifican generalmente atendiendo al proceso que se sigue para su manufactura. Así, tenemos que existen:

- a) Geotextiles tejidos
- b) Geotextiles no-tejidos
- c) Geotextiles ligados

En la fig. 4.1 puede observarse la diferencia entre estos tres tipos de teles sintéticas.

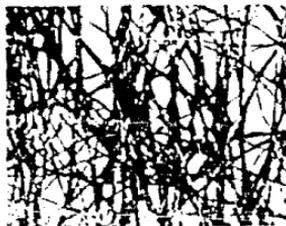


FIG. 4.1 FOTOGRAFÍAS ALMENTADAS DE GEOTEXTILES: (TEJIDOS), (NO-TEJIDOS) Y (LIGADOS), (Ref 6)

4.1.3.a Geotextiles tejidos

Se forman por el entrecruzamiento de dos series de hilos paralelos, y se fabrican mediante maquinaria de tejido convencional, siendo posible una gran variedad de patrones. Aunque casi -

siempre los dos juegos de hilos son perpendiculares entre sí, -
existen urdimbres especiales en las que forman un ángulo oblicuo.

Dependiendo del tipo de hilo usado pueden ser:

- 1) Geotextiles tejidos con hilos monofilamentos, formados según la técnica del tejido tradicional. Su característica principal es que son muy permeables ya que el tamaño de sus poros es bastante uniforme.
- 2) Geotextiles tejidos con hilos multifilamentos, en los que el elemento base de la estructura se compone de varias hebras individuales con un diámetro de decenas de micras. Estas telas presentan propiedades mecánicas favorables, como una buena resistencia a la tensión y al desgarramiento. Su permeabilidad es de nivel aceptable y su capacidad de retención de elementos finos es del orden de una centena de micra.
- 3) Geotextiles tejidos con cintas, que se componen de tiras de película plástica entrelazadas. Su permeabilidad es baja y son muy sensibles a la perforación.

Tal vez la característica principal de todos los geotextiles tejidos es que presentan una anisotropía muy marcada puesto que poseen dos direcciones preferenciales en las que su módulo de elasticidad y su resistencia a la tensión tienen un valor máximo.

4.1.3.b Geotextiles no-tejidos

Se forman con filamentos y/o fibras cortas, repartidos de manera aleatoria y unidos mediante un tratamiento químico, térmico o mecánico.

1) Geotextiles no-tejidos, fabricados mediante un proceso químico. Son aquellos en los que la unión de fibras se logra agregando una sustancia cementante, tal como: cemento, goma, latex, almidón derivado de la celulosa, o más frecuentemente una resina sintética. Esta forma de unión no es muy buena por que puede romperse fácilmente por la acción de una pequeña sollicitación. Los geotextiles hechos de esta manera presentan un módulo de elasticidad bajo.

2) Geotextiles no-tejidos, fabricados mediante un proceso térmico. En este caso se somete a las fibras a un proceso de calandrado (efecto conjurado de presión y calor), haciéndolas pasar a través de rodillos calientes, para provocar la fundición parcial de las más grandes y lograr que éstas se adhieran a las demás en los puntos de cruce.

Dependiendo de las características de los filamentos, este procedimiento puede tener dos variantes:

- a) Cuando todos los filamentos están compuestos por un solo tipo de polímero, y el calor aplicado provoca la fundición parcial de éstos para que se adhieran entre sí.
- b) Cuando algunos de los filamentos se componen de dos tipos de polímeros, con diferente punto de fusión, y se contra la aplicación de calor y presión para fundir solamente al polímero más susceptible al proceso, y formar con él las uniones.

Los geotextiles fabricados mediante cualquiera de estas dos alternativas son relativamente delgados, con espesores entre 0.5 y 1 mm; se logran así, productos de alta resistencia y de bajo peso (100 a 400 g/cm²). Sin embargo, su resistencia

al desgarramiento no es muy buena debido a la rigidez de las uniones. Por otro lado, su porcentaje de porosidad es bajo, comparado con el de otro tipo de telas.

- 3) Geotextiles no-tejidos, fabricados mediante un proceso mecánico. Se crean introduciendo la red de hilos ya orientados en una máquina equipada con una serie de agujas de diseño muy especial, las cuales se hacen pasar a través de dicha red para lograr un entrelazamiento totalmente aleatorio. Estos geotextiles son relativamente gruesos, pudiendo presentar espesores entre 1 y 5 mm. Además, son muy densos (su peso varía entre 7.5 y 3.3 g/cm²). La resistencia al desgarramiento es muy buena en estas telas debido a que las uniones pueden deslizarse y orientarse en la dirección que actúe el esfuerzo máximo. Como los filamentos utilizados son generalmente largos, la sollicitación tiene un campo muy extenso para difundirse. Su módulo de elasticidad es en un principio bajo, hasta que cesa el deslizamiento de las uniones, después de un cierto nivel de deformación.

4.1.3.c Geotextiles ligados

Se forman entrelazando una serie de hilos mediante un verdadero tejido de punto. La manera en que los hilos son entrelazados identifica al tipo de liga, como el "jersey", por ejemplo. Los hilos usualmente utilizados para fabricar estas telas son: los monofilamentos, multifilamentos y fibrilados. En la actualidad es muy raro el uso de este tipo de telas en la geotecnia.

4.2 Propiedades

La capacidad de un geotextil para desempeñarse en una aplicación específica es función de sus propiedades, así que éstas deben definirse correctamente para que al comparárlas con las

Las propiedades requeridas en dicha aplicación pueda llevarse a cabo el diseño o la elección de la tela que cumpla en forma adecuada con el factor de seguridad preestablecido.

Para valorar la adaptabilidad de las diferentes telas que existen en el mercado, se emplea la siguiente expresión:

$$P.S. = \frac{\text{Propiedad del geotextil evaluado}}{\text{Propiedad requerida}} \dots (\text{Ec.4.1})$$

donde,

P.S. = Factor de seguridad

Se logra un diseño aceptable cuando la comparación entre el factor de seguridad preestablecido y el calculado con la expresión indicada resulta favorable.

Debido a la gran cantidad de variantes que puede haber en el proceso de fabricación de los geotextiles, los valores que definen sus propiedades oscilan entre rangos muy amplios. Esto hace ver la necesidad de contar con métodos de ensaye específicos, los cuales permitan realizar una evaluación precisa proporcionando resultados consistentes.

Actualmente no existe todavía una total unificación en cuanto al uso de métodos de ensaye estandarizados para la evaluación de todas las propiedades de los geotextiles, sin embargo hay algunos de éstos que se han venido generalizando.

En la descripción que se muestra a continuación de cada propiedad, se hace referencia a aquellos métodos de uso más común y a los establecidos por la ASTM.

Basicamente, las propiedades de los geotextiles pueden agruparse en cinco categorías:

- 1) Físicas
- 2) Mecánicas
- 3) Hidráulicas
- 4) De durabilidad
- 5) De resistencia al intemperismo

4.2.1 Propiedades físicas

Son las más aparentes y fáciles de evaluar; de hecho, los fabricantes proporcionan toda la información referente a ellas.

4.2.1.a Densidad

Se acostumbra definir como la relación entre el peso volumétrico de una sustancia con el del agua a una temperatura de 4°C. En el caso de los geotextiles el valor que se maneja depende del polímero empleado para la fabricación de fibras.

Algunos valores típicos para los materiales comúnmente empleados son:

Polipropileno	0.91
Poliéster	1.22 a 1.38
Nylon	1.05 a 1.14

4.2.1.b Masa por unidad de área (peso)

Es el término correcto para referirse al peso de una tela. Se expresa en unidades de onzas por yarda cuadrada (oz/yd^2) o gramos por metro cuadrado (gr/m^2). El método establecido por la ASTM para evaluar esta propiedad es el designado con la clave D1910. De acuerdo con él, la masa (peso) debe medirse con una precisión de un centésimo de pulgada y la longitud y el ancho bajo un estado de tensión nula.

El rango de valores típicos, considerando las diferentes clases de polímeros, es de 4 a 20 oz/yard² (135 a 630 gr/m²).

4.2.1.c Espesor

Se define como la distancia entre las superficies superior e inferior de la tela, medida bajo una presión específica. El método DL777 de la ASTM establece que dicha medición debe realizarse con una precisión de un milésimo de pulgada, y que la presión por aplicar estará en función de la consistencia del material (tabla 4.2).

CONSISTENCIA DE LA TELA	RANGO DE PRESIONES	
	(Lbs/pulg ²)	(Kg/cm ²)
Blanda	0.0005-0.5000	0.0000-0.0352
Media	0.0200-2.0000	0.0014-0.1406
Firme	0.1000-10.0000	0.0070-0.7031

TABLA 4.2 PRESIONES RECOMENDADAS POR LA ASTM PARA MEDIR EL ESPESOR DE LOS GEOTEXILES (Ref. 6)

Al parecer, existe una tendencia común de aplicar una presión de 2 KPa (0.29 Lbs/pulg² = 0.02 Kg/cm²), es decir, una presión aplicable a geotextiles firmes según la ASTM.

El rango en que varía el espesor de las telas más comúnmente usadas es de 10 a 20 mils (1 mil=0.001 pulg=0.002 cm).

4.2.2 Propiedades mecánicas

Son las que determinan la resistencia de los geotextiles a los diferentes tipos de esfuerzos a que pueden estar sometidos durante el funcionamiento de las obras a las que se incorporan, o bien durante el proceso de instalación.

4.2.2.a Compresibilidad

Es la modificación del espesor de las telas por la variación de la presión normal que actúa sobre ellas. En la mayoría de los

geotextiles la compresibilidad es relativamente baja y de consecuencias poco importantes en su comportamiento, a menos que se trate de telas no-tejidas agujadas, cuya función principal sea conducir agua a través de su propio plano, ya que al reducirse el espesor disminuye esta capacidad de drenaje (fig. 4.2).

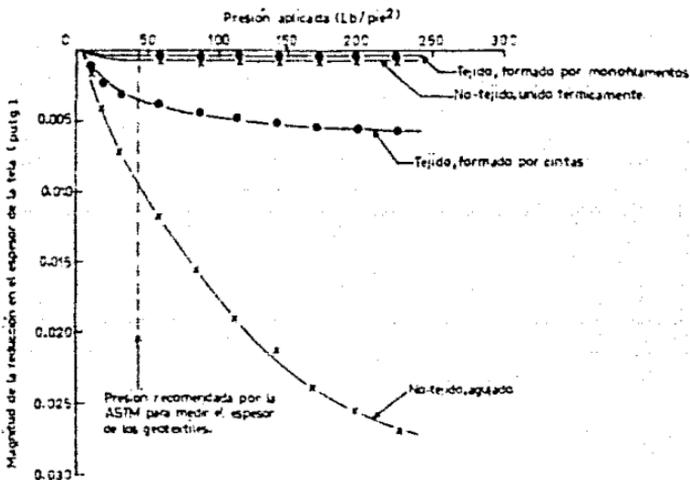


FIG. 4.2 COMPRESIBILIDAD DE DIFERENTES TIPOS DE GEOTEXTILES (Ref. 6)

La pendiente de la parte inicial de las curvas es el módulo de compresibilidad (cuyo valor inverso es el coeficiente de compresibilidad); el conocimiento de esta propiedad es muy útil para las aplicaciones relacionadas con el drenaje en suelos.

4.2.2.b Resistencia a tensión

Esta es quizá la propiedad mecánica más importante ya que juega un papel principal en muchas de sus aplicaciones. La prueba para evaluarla consiste en someter a las telas a un proceso de esti

amiento hasta que ocurra la falla. Durante el proceso de extensión se lleva registro de la fuerza aplicada y de la deformación, de tal manera que puede construirse una gráfica de esfuerzo contra deformación unitaria (fig. 4.3).

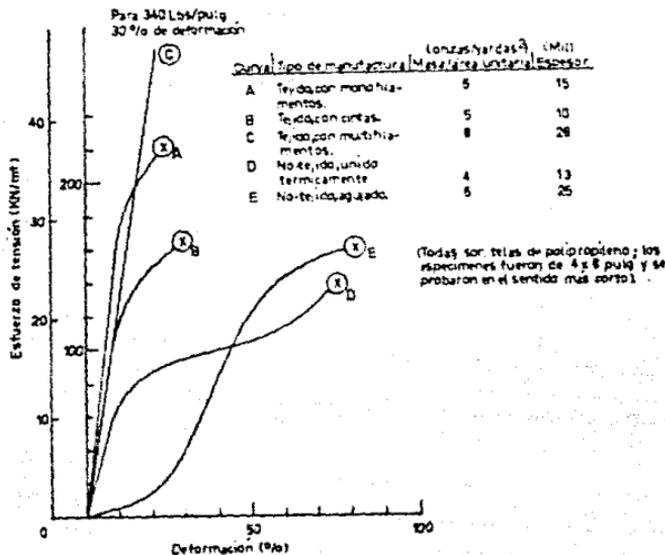


FIG. 4.3 RESPUESTA A LA TENSION DE LOS GEOTEXTILES (Ret 6.1)

A partir de dicha gráfica pueden obtenerse los valores del máximo esfuerzo de tensión, del módulo de elasticidad y de la deformación a la falla.

Debido a que la prueba para evaluar esta propiedad es una de las principales referencias para definir la resistencia de los geotextiles, se ha discutido mucho sobre algunos aspectos de su

realización; entre ellos figuran como los más importantes: la forma de obtener el módulo de elasticidad y el tamaño del espécimen a usar.

Por lo que respecta al primer punto, existen tres procedimientos alternativos para definir la pendiente inicial de la curva -esfuerzo-deformación:

- 1) Uso de la tangente inicial. Es aplicable en muchas telas tejidas tanto en el sentido largo del espécimen como en el corto, y en algunas no-tejidas, cuando la pendiente inicial tiene de bastante a ser una recta (curvas A, B, C y D de fig. 4.3).
- 2) Uso de una tangente compensada. Se aplica cuando la pendiente inicial es pequeña, lo cual es típico de las telas no-tejidas agujadas. En este caso no se considera la parte inicial de la curva de respuesta y se transfiere el eje vertical hasta el punto en que la pendiente comienza a ser pronunciada (curva E de fig. 4.3).
- 3) Uso de una secante. Con objeto de lograr mayor precisión, uno podría obtener el módulo correspondiente a un determinado valor de deformación trazando una línea que parte desde el origen hasta intersectar a la curva en el punto escogido.

Respecto al tamaño del espécimen a utilizar en las pruebas, -la tendencia ha sido emplear el más ancho posible, aunque según los procedimientos D1632 y D751 de la ASTM son permisibles ciertas variantes, por lo que los esfuerzos transmitidos son distintos. En la fig. 4.4 se muestran los tamaños comúnmente usados de especímenes.

La razón por la que se recomienda usar especímenes anchos es que con ellos se desarrolla más rápidamente la ruptura, siendo -

más representativo el valor de resistencia que se obtiene, con lo que el diseño resulta mejor.

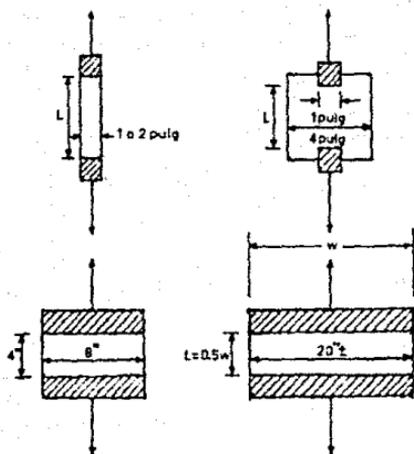


FIG.4A TAMAÑOS DE ESPÉCIMENES USADOS EN LA PRUEBA DE TENSION (ref.6)

4.2.2.c Resistencia a la fatiga

Se define como la capacidad de un geotextil para soportar cargas que actúan repetidamente sobre él. La prueba desarrollada para determinarla consiste en lo siguiente: se remete al espécimen a un esfuerzo de tensión hasta alcanzar una deformación correspondiente a una determinada longitud, para luego disminuir la fuerza aplicada hasta un valor de cero; el ciclo se repite una y otra vez hasta que ocurre la falla. Este ensayo representa mejor las condiciones de servicio de los geotextiles usados para refuerzo que la mayoría de las pruebas estáticas. Los resultados más importantes del mismo son el número de ciclos requeridos para llevar a la falla a la tela y el esfuerzo aplicado, expresado como una frag

ción del esfuerzo con el cual se produjo la falla en la prueba de tensión. Es de esperarse que mientras más bajo sea el esfuerzo que se aplique, mayor será el número de ciclos requeridos para llevar a la falla a la tela.

4.2.2.d Resistencia al reventamiento

Para evaluar esta propiedad puede recurrirse a la prueba "Mullen", registrada en la ASTM como procedimiento D3776, que consiste en someter a un espécimen del geotextil a una presión axial de un ánabolo de hule en forma de burbuja, que es accionado por un sistema hidráulico. La tela revienta cuando ya no admite más deformación, y se toma nota entonces de la máxima presión aplicada. Otro posible método es el diseñado con la clave D751, el cual es muy similar al anterior.

4.2.2.e Resistencia al desgarramiento

Debido a que frecuentemente, durante la instalación de los geotextiles, se presentan sollicitaciones que pueden producir su desgarramiento, se han desarrollado pruebas para evaluar que tan susceptibles pueden ser a esta situación.

Una de ellas es la prueba "trapezoidal", registrada como el procedimiento D2263 en la ASTM, que actualmente se encuentra en desuso. En ella se colocaba a la tela en la máquina para ensayos de tensión, orientándola de forma que se lograra desgarrrarla a partir de un corte inicial de 5/8 de pulg (1.60 cm) de longitud.

Otra prueba es la de "lengüeta", que es similar a la anterior, en la que se hace uso de un espécimen de 3 X 2 pulg (7.6 X 20.3 cm), con un corte de 1 pulg. (7.6 cm) de largo. La tela se coloca en la máquina de ensayos de tensión, de forma que cada te

naza sujeta un extremo del corte. Se aplica entonces una fuerza de tensión que aumenta progresivamente para provocar el desgarramiento de la tela a lo largo del corte inicial. Los resultados - que se obtienen con esta prueba son generalmente mayores que los de la prueba "trapezoidal" ya que en este caso se permite que - los hilos se enreden y traben en forma conjunta para resistir la propagación del desgarramiento.

4.2.2.f Resistencia a impactos

Se ha observado que la caída de objetos pesados sobre los geo textiles puede provocarles perforaciones. A raíz de ello se han - desarrollado un cierto número de pruebas para evaluar la resis-- tencia de las telas a los impactos. Dichas pruebas hacen uso de un cono o una pirámide de cierto peso que dejan caer libremente desde una determinada altura sobre una muestra de tela sujeta firmemente dentro de un contenedor como el recipiente usado en - la prueba de VRS. El grado de penetración del objeto pesado en - la tela indica la resistencia que ésta presenta al impacto. Otra manera menos subjetiva de medir ésto consiste en aplicar varios golpes en forma continua, con el mismo objeto pesado, a través de una máquina en la cual pueda leerse directamente la energía apli cada al momento de atravesarse la tela.

4.2.2.g Resistencia a la perforación

Así como se requiere conocer la resistencia de los texti-- les ante fenómenos dinámicos como son los impactos, también exis te la necesidad de evaluar su resistencia a la perforación provo cada por objetos, como troncos o maderas, bajo condiciones casi - estáticas; para tal efecto se han desarrollado pruebas como el -

procedimiento D3737 de la ASTM, en el que se sustituye al objeto punzocortante por un vástago de metal con punta redondeada, que generalmente presenta un diámetro de 5/16 de pulg. (0.30 cm), con el cual se traspasa a la muestra de tela sujeta firmemente dentro de un cilindro de 1.75 pulg. (4.5 cm) de diámetro interior.

4.2.2.h Fricción entre suelo y geotextil

En muchas aplicaciones se requiere conocer la fricción que -- puede generarse entre una tela y el suelo que esté en contacto -- con ella. El ensaye más socorrido para evaluar dicha fricción es una adaptación de la prueba de corte directo que se usa en mecánica de suelos (fig. 4.5.a).

En el ensaye, la tela queda sujeta a la parte superior del aparato de corte, mientras que en la parte inferior se coloca a la muestra de suelo. En seguida, se genera un esfuerzo normal constante, el cual representará un cierto confinamiento; y por último, se aplica la fuerza de corte hasta provocar el deslizamiento de la tela sobre el suelo. Después de repetir el proceso para diferentes valores de esfuerzo normal, se establece una cierta tendencia de la que pueden deducirse los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del sistema. Aunque éstos tienen relación -- con los parámetros de resistencia que presenta el suelo, no son necesariamente los mismos; en todo caso, los parámetros del suelo constituyen los valores límite para los que presenta el sistema suelo-tela.

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de una serie de -- pruebas realizadas con cuatro tipos de geotextiles y tres diferentes suelos granulares, indicándose para todos los casos la eficiencia del sistema suelo-tela.

TIPO DE GEOTEXTIL	ARENA BIEN GRADUADA ($\phi=30^\circ$)	ARENA UNIFORME ($\phi=28^\circ$)	LIMO ARENOSO ($\phi=26^\circ$)
Tejido con filamentos (Polyfilter X)	26° (37%)	---	---
Tejido con cintas (500 X)	24° (80%)	24° (36%)	23° (35%)
No-tejido termosoldado (5401)	26° (37%)	---	---
No-tejido agujado	30° (100%)	26° (93%)	25° (96%)

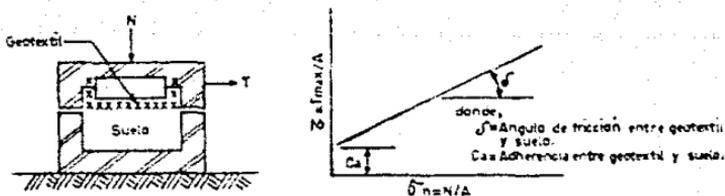
TABLA 4.3 ANGIOS DE FRICCIÓN ENTRE SUELO Y TELA Y EFICIENCIA RESPECTO AL VALOR QUE CORRESPONDE AL SUELO SOLAMENTE (RM. 5.1)

En dicha tabla observamos que prácticamente con todos los geo textiles se genera un alto porcentaje de la fricción que se desarrolla en la propia masa de los suelos.

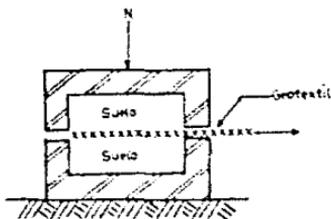
4.2.2.1 Adherencia

Con frecuencia se hace uso de los geotextiles para reforzar estructuras de tierra como terraplenas, diques o presas. Esto se logra confinando a la tela en la masa del suelo que forma a la estructura, de manera tal, que se interrumpa a la superficie de confinamiento o plano de falla, para que actúe como una ancla que ayude a soportar los esfuerzos cortantes generados sobre dicha superficie. Dicho refuerzo depende de la adherencia entre la tela y el suelo, la cual puede evaluarse en el laboratorio mediante una prueba como la mostrada en la figura 4.5.b.

La resistencia que ofrece la tela a ser removida está determinada por el confinamiento que proporciona el material adyacente.



a) Prueba de fricción entre suelo y tela y sus resultados.



b) Prueba de anclaje.

FIG.4.5 SISTEMAS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE Y LA CAPACIDAD DE ANCLAJE DE LOS GEOTEXTILES CUANDO ESTAN CONFINADOS EN UN SUELO (ref. 61)

Los resultados de las pruebas de "anclaje" presentan cierta relación con los obtenidos en los ensayos para evaluar la fricción entre suelo y tela, sin embargo, el estado de esfuerzos que se genera en el primer caso es más complejo y es necesaria todavía una mayor investigación.

4.2.3 Propiedades Hidráulicas

Para evaluarlas ha sido necesario desarrollar métodos de ensayo completamente originales ya que no existen antecedentes en la industria textil de pruebas aplicadas a las telas para determinar el flujo de agua que puede pasar a través de ellas.

4.2.3.a Porosidad

Se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la tela y se calcula con la siguiente expresión:

$$n = 1 - \frac{m}{ft} \quad \dots \text{ (Ec. 4.2)}$$

donde,

- n = Porosidad
- m = Masa por unidad de área
- f = Densidad
- t = Espesor de la tela

La porosidad es muy sensible a cualquier cambio en el espesor de los geotextiles por la aplicación de cargas.

4.2.3.b Porcentaje de Área Abierta (FOA)

Esta propiedad solo se puede evaluar en las telas tejidas, especialmente en las formadas por monofilamentos. Se define como la comparación entre el área abierta total (suma de los espacios vacíos entre las fibras) y el área total del espécimen. Una forma muy eficaz para medir el área abierta consiste en hacer pasar una luz a través de la tela y ver su proyección sobre una pantalla colocada atrás de ella. Los espacios abiertos amplificadas pueden ser medidos y cuantificados mediante un micrómetro o el uso de una cuadrícula previamente dibujada en la pantalla.

La estructura de las telas tejidas hechas con monofilamentos - varía desde muy cerrada (FOA=0) hasta poco abierta, con un porcentaje máximo de 35 %, sin embargo, la mayoría de las telas disponibles en el mercado presentan valores comprendidos en un rango de 4 a 3 %.

Es evidente que el procedimiento descrito para la evaluación de esta propiedad no sería aplicable a telas no-tejidas, debido a que el entrelazamiento aleatorio de las fibras no permitiría que

pasara la luz, asi que se requeriria de algun otro método alternativo para poder hacerlo en ellas.

4.2.3.c Tamaño aparente o tamaño equivalente de poros (AOS o EOS)

Está definido en la norma CW-02215 de la ASTM como el número de la malla para cribado que presenta aberturas con un tamaño aproximadamente igual al de los poros de una tela. En la prueba desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros Civiles del Ejército de Estados Unidos para evaluar esta propiedad se hace uso de pequeñas bolitas de vidrio de tamaño conocido y designado con un número. El método de ensaye consiste en determinar mediante cribado, empleando bolitas de diferente tamaño cada vez, el tamaño de éstas con el cual pasa el 5 %, en peso, o una cantidad menor a través de una tela. Entonces el AOS o el EOS será el número de la malla con la que en forma equivalente se retenga una fracción mayor o igual al 95 %, en peso, de las mismas bolitas. Algunas veces el valor que se menciona es el tamaño de la abertura equivalente en milímetros, es decir, el tamaño de las aberturas de la malla con la que se retuvo dicho porcentaje de partículas u "C₉₅".

Aunque la prueba descrita es ampliamente usada, hay algunos inconvenientes que no permiten que sea completamente aceptable:

- 1) Las bolitas de vidrio pueden fácilmente quedar atrapadas -- dentro de las telas (sobretudo en las no-tejidas muy voluminosas).
- 2) La fibras de algunas telas pueden moverse, unas con respecto a otras, mientras no estén confinadas (en el caso de las telas formadas por cintas), provocando que los espacios se agranden y que pasen bolitas de mayor tamaño, lo cual no es representativo de la situación de servicio de los geotextiles.

- 3) La reproducción de la prueba no es buena ya que los resultados se ven afectados por la temperatura, la humedad y la variación en el tamaño real de las bolitas de vidrio.
- 4) El ensayo se basa solamente en la obtención de un tamaño específico de poros, y no de toda la distribución, que sería lo deseable (fig. 4.6).

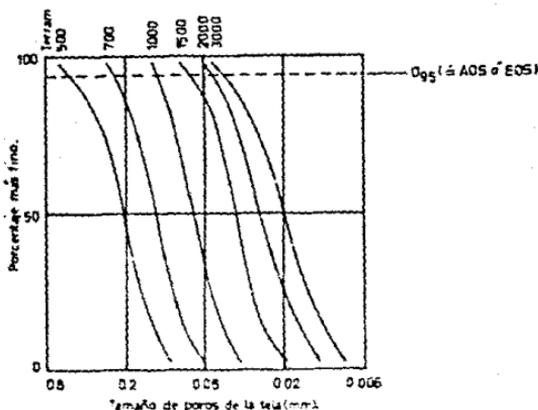


FIG. 4.6 DISTRIBUCIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LOS POROS EN LOS GEOTEXTILES TERRAM (Ref. 5).

4.2.3.d Permitividad

Una de las principales funciones que realizan los geotextiles es la filtración, razón por la cual es muy importante poder evaluar la capacidad que poseen de permitir el paso del agua a través de ellos.

Como se explicó antes, el espesor de los geotextiles se modifica bajo la acción de cargas, así es que para cuantificar la permeabilidad se debe tener en cuenta la variabilidad de tal dimen-

sión, siendo necesario manejar un valor que esté en función de γ .

De esta manera se establece el concepto de "permitividad":

$$\gamma = \frac{Kn}{t} \quad \dots \text{ (Ec. 4.3)}$$

donde,

γ = Permitividad

Kn = Coeficiente de permeabilidad normal al plano

t = Espesor de la tela

Este concepto se relaciona con la fórmula de Darcy de la siguiente forma:

$$q = KiA$$

$$q = Kn \left(\frac{\Delta h}{t} \right) A$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{Kn}{t} = \frac{q}{A \Delta h} \quad \dots \text{ (Ec. 4.3')}$$

donde,

q = Gasto unitario

Δh = Pérdida de carga

A = Area de tela probada

El procedimiento indicado es aplicable a pruebas bajo carga constante, similares a los ensayos de permeabilidad para suelos. Por lo mismo, existe la posibilidad también de aplicar el concepto de carga variable, tal como se hace en los suelos.

Para ese caso la expresión con la que se obtiene la permitividad es la siguiente:

$$\gamma = \frac{kn}{t} = 2.3 \frac{n}{A \Delta t} \log_{10} \frac{h_0}{h_f} \quad \dots \text{ (Ec. 4.3'')}$$

donde,

- γ = Permitividad
- a = Area de la tubería fija de abastecimiento
- A = Area del espécimen de tela
- Δt = Tiempo transcurrido entre h_0 y h_f
- h_0 = Carga al principio de la prueba
- h_f = Carga al final de la prueba

Si se quiere conocer el coeficiente tradicional de permeabilidad de un geotextil bastará multiplicar el valor de permitividad por su espesor.

Los valores típicos obtenidos de ambas pruebas descritas varían en los siguientes rangos:

Permitividad (γ) = 0.02 a 2.2 seg^{-1}

Permeabilidad (K_n) = 0.0008 a 0.23 cm/seg

4.2.3.e Transmisividad

Esta propiedad se refiere a la capacidad de los geotextiles para permitir un flujo de agua sobre su propio plano (función drenante). Como en el caso anterior, la variación del espesor de la tela influye de manera importante; por tanto, es necesario definirla en función de dicha característica:

$$Q = K_p t \quad \dots \text{ (Ec. 4.4)}$$

donde,

- Q = Transmisividad
- K_p = Coeficiente de permeabilidad paralela al plano
- t = Espesor de la tela

Relacionando esta expresión con la fórmula de Darcy resulta
que:

$$q = Kp A$$

$$q = Kp \left(\frac{\Delta h}{L} \right) (wt)$$

$$\Rightarrow Q = Kpt = \frac{qL}{hw} \quad \dots \text{(Ec. 4.4')}$$

donde,

- q = Gasto unitario
- h = Pérdida de carga
- L = Longitud del espécimen de tela
- w = Ancho del espécimen de tela

Han sido varios los aparatos que se han desarrollado para evaluar esta propiedad; uno de ellos se muestra en forma esquemática en la figura 4.7.

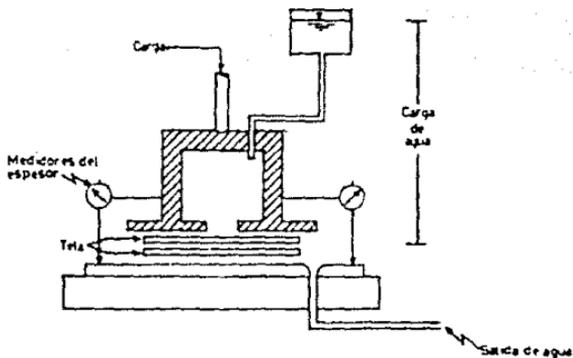


FIG. 4.7 APARATO DE FLUJO RADIAL PARA EVALUAR LA TRANSMISIVIDAD DE LOS GEOTEXTILES (Ref 6).

Aplicando la teoría para este caso específico, se tiene que:

$$q = Kri A$$

$$q = Kp \left(\frac{dh}{dr} \right) (2\pi r t)$$

$$2 \pi K p t \int dr = q \int \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow \theta = K p t = \frac{q \ln (r_2/r_1)}{2 h} \dots (\text{Ec. 4.4''})$$

donde,

r_1 = Radio interior del espécimen de tela

r_2 = Radio exterior del espécimen de tela

Evidentemente las telas más gruesas, del tipo de las no-tejidas y agujadas, son las más apropiadas para conducir agua sobre su propio plano, pero al mismo tiempo son las más susceptibles a la reducción del espesor por la acción de una fuerza normal. En la fig. 4.8 se muestra el decremento casi exponencial en la transmisividad de dichas telas por la acción de cargas.

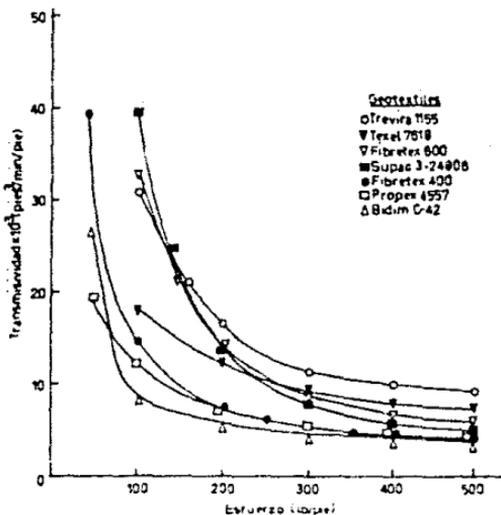


FIG. 4.8 VARIACION DE LA TRANSMISIVIDAD DE GEOTEXTILES NO-TEJIDOS AGUADOS, SOMETIDOS A ESFUERZOS NORMALES (RM. 6)

Afortunadamente, la mayoría de los geotextiles alcanzan valores constantes de transmisividad después de 500 Lbs/pie² (0.241 Kg/cm²) de presión normal.

4.2.3.f Capacidad de retención

La evaluación de esta propiedad es muy necesaria cuando los geotextiles se utilizan como pantallas retenedoras de materiales finos, bajo el agua o en la superficie.

En la prueba desarrollada para evaluarla se hace uso de dos tanques rectangulares que se colocan uno frente al otro, de manera que coincidan los extremos en los que tienen una pequeña compuerta. El espécimen de la tela evaluada se pone entre ambas compuertas. Hecho ésto, se llena uno de los tanques con agua y se agrega luego una cierta cantidad de limo que se reparte uniformemente en el depósito. Después, se abren las compuertas de ambos tanques y se permite que el agua turbia pase de uno a otro a través del filtro que constituye la tela. Durante el proceso se mantiene el mismo nivel de agua en el primer tanque abasteciéndolo en forma constante con agua limpia.

Al final de la prueba los resultados que se obtienen son:

- 1) La magnitud y velocidad del flujo de agua que pasa a través de la tela.
- 2) El porcentaje de sólidos que se retiene en la tela durante el tiempo que tarda en aclararse el agua en el primer tanque.

4.2.3.g Impermeabilidad

Esta es una propiedad que solo es posible evaluarla en geotextiles que hayan sido impregnados con una resina sintética para emplazarlos como capas impermeables, en el revestimiento de canales por ejemplo.

La prueba para determinarla consiste en medir la cantidad de vapor de agua que puede pasar a través de una tela.

Realmente este método está dirigido a las geomembranas, que también son telas de plástico, pero que se diferencian de los geotextiles por ser totalmente impermeables de origen.

4.2.4 Propiedades de durabilidad

Debido a que los geotextiles son materiales relativamente nuevos, se ha cuestionado si su comportamiento podrá ser adecuado después de cierto tiempo de uso constante. Para contestar a tal interrogante se han ideado diferentes formas de evaluar las alteraciones que pueden sufrir sus propiedades por estar sometidos a condiciones severas de servicio.

4.2.4.a Susceptibilidad al flujo plástico

Se refiere a la elongación total que puede alcanzar una tela bajo carga constante. Su evaluación es muy importante debido a que la deformabilidad de los polímeros es en general alta.

Para el ensaye se debe contar con toda una variedad de especímenes de diferentes tamaños, los cuales se someten a tensión constante colgándoles pesas. Como la duración de la prueba puede ser muy larga se acostumbra evaluar varios especímenes al mismo tiempo aplicando diferentes cargas. Generalmente, la magnitud de éstas constituye un porcentaje de la fuerza máxima registrada en el ensaye de tensión convencional (25, 50 y 75 %). El tiempo durante el cual se deja que actúen las cargas llega a sobrepasar las 100 horas, y se toman lecturas de la deformación en forma progresiva para intervalos de tiempo cada vez mayores (a 1, 5, 10, 15, 20 y 45 min., y luego a 1, 2, 4, 8 y 24 hrs.). El porcentaje de deformación se gráfica contra el tiempo para cada incremento de esfuerzo, y entonces la magnitud del flujo plástico se calcula a partir de las curvas de respuesta considerando el intervalo entre 10 y 100 hrs.

4.2.4.b Resistencia a la abrasión

Se entiende como la resistencia al desgaste generado por el rozamiento con otra superficie. La forma más común de evaluarla es haciendo uso de la plataforma rotatoria de cabeza doble, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

- 1º) A ambas cabezas de 1kg de peso se les equipa con ruedas vitrificadas de abrasión.
- 2º) Se le da forma al espécimen de tela de un disco de 3.5 pulg. (8.75cm) de diámetro exterior y 2.5 pulg. (6.25cm) de diámetro interior, y se le coloca en la plataforma rotatoria.
- 3º) Se somete al espécimen a la abrasión generada por las ruedas vitrificadas, programadas para realizar 1000 ciclos.
- 4º) Se cortan dos tiras del espécimen sometido al proceso de abrasión, de 1 a 2 pulg. (2.5 a 5 cm) de ancho, atravesando la parte más gastada y se prueba su resistencia a la tensión.
- 5º) Se compara entonces el valor promedio de la resistencia a tensión de los dos especímenes con el obtenido para una muestra intacta de la misma tela y se obtiene el porcentaje de resistencia remanente.

Cabe señalar que esta prueba no es adecuada para las telas no tejidas ya que existe una tendencia de sus fibras a impedir la rotación de las ruedas que generan la abrasión.

4.2.4.c Susceptibilidad a la obstrucción

Este es el aspecto más importante en la durabilidad de un geotextil cuando su función principal es servir como filtro.

El método de ensaye más directo consiste en tomar una muestra inalterada del suelo que existe en el sitio donde se piense instalar el geotextil y colocarla sobre una muestra del mismo dentro de un cilindro de prueba, como el usado para determinar la permeabilidad de los suelos. Se observa entonces el funcionamiento del sistema suelo-tela bajo un flujo de agua con carga constante por un largo periodo. En la fig. 4.9.a se muestra como puede construirse un sistema para evaluar en forma simultánea a varios geotextiles.

La respuesta de las telas consiste en un principio en una disminución constante de la magnitud del flujo, cuya duración dependerá de la compacidad o consistencia que presente el suelo. Después de un periodo de transición de aproximadamente 10 hrs. (para suelos friccionalantes) a 200 hrs. (para suelos cohesivos), el sistema empezará a presentar el comportamiento de campo simulado. Si la pendiente de la gráfica de respuesta se vuelve cero después de este periodo de transición significa que la tela es compatible con el suelo (al menos para las condiciones reproducidas en la prueba) y que será muy baja la probabilidad de que se obstruyan sus poros. Por otro lado, si la pendiente no se vuelve cero significa que el geotextil no es apropiado para el tipo de suelo y condiciones presentes en la prueba ya que eventualmente podría ocurrir la obstrucción total de sus poros (fig. 4.9.b).

El gran inconveniente de esta prueba es que requiere de mucho tiempo para su ejecución, ya que normalmente deben pasar más de 40 días para establecer la pendiente de la gráfica costo vs. tiempo, después del periodo de transición. Además, existe el problema de la generación de micro-organismos dentro del cilindro de prueba por lo tardado del proceso, lo cual afecta los resultados.



(a)

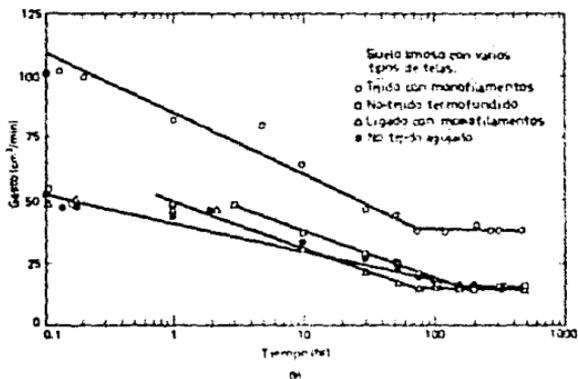


FIG. 9 PRUEBAS DE FILTRACION A LARGO PLAZO EN DIFERENTES SISTEMAS SUELO TELA (a) Y CURVAS DE RESPUESTA TÍPICAS (b) (c) (d) G.M.C.).

Otra alternativa para definir la compatibilidad hidráulica entre un suelo cualquiera y un geotextil es llevar a cabo la prueba de relación de gradientes, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos. En ella, la configuración del flujo se establece en forma similar a la de la prueba a largo plazo, pero el resultado final puede obtenerse en 24 hrs. Y es que en este caso, en lugar de medir la variación del flujo se mide la carga hidráulica en varios puntos de la columna suelo-tela; las diferencias se transforman en gradientes y se calcula la relación de gradientes como sigue:

$$GR = \frac{i_1}{i_2} = \frac{\frac{H_1}{L_1}}{\frac{(H_2+H_3)}{(L_2+L_3)}}$$

donde,

i_1 = Gradiente hidráulico medido entre una pulgada por arriba del geotextil y la parte inferior de éste.

i_2 = Gradiente hidráulico medido entre una y tres pulgadas por encima del geotextil, en el suelo sobreyacente.

H_1, H_2 y H_3 = Carga hidráulica a una, dos y tres pulgadas, respectivamente, por encima del geotextil.

$L_1 = L_2 = L_3 = 1$ pulg. (2.54 cm)

El Cuerpo de Ingenieros establece que para valores de GR mayores que 3 las telas no son compatibles con el tipo de suelo empleado en la prueba (fig. 4.10.b).

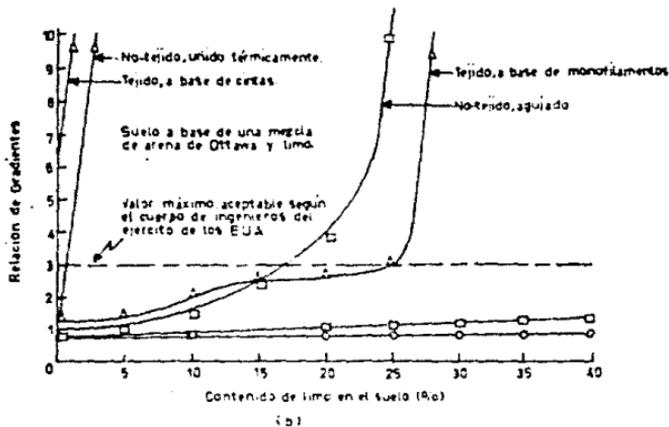
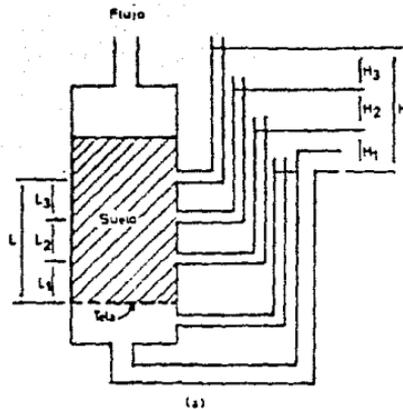


FIG. 4.30 ARREGLO PARA LA DETERMINACION DE LA RELACION DE GRADIENTES (a) Y EJEMPLOS DE RESULTADOS PARA ILUSTRAR LA SUCCEPTIBILIDAD A LA OBSTRUCCION DE UN GEOTEXTIL (b), (Ref. 6 2).

En la figura anterior se ilustra la evaluación de diversos tipos de telas para ver su compatibilidad con distintos tipos de suelos. Estos últimos se variaron sistemáticamente desde una arena bien graduada hasta mezclas controladas de arena y limo, haciendo variar el porcentaje del material fino hasta tener suelos mal graduados. Los resultados obtenidos favorecen en gran medida el uso de telas tejidas hechas con monofilamentos en aplicaciones hidráulicas críticas, es decir, cuando los gradientes hidráulicos sean altos, se trate de suelos no-cohesivos y la distribución de tamaños de sus partículas sea indeseable desde el punto de vista geotécnico. En segundo término puede considerarse a los geotextiles no tejidos agujados, que también muestran un comportamiento adecuado.

No obstante que la prueba de relación de gradientes presenta grandes ventajas comparada con la de flujo a largo plazo también tiene inconvenientes como la tubificación que ocurre a lo largo de las paredes del cilindro de prueba, la presencia indeseable de aire en el suelo, la tela y el sistema de tuberías, y la falta de tiempo para que el sistema alcance una completa estabilidad.

4.2.5 Propiedades de resistencia al intemperismo

Su conocimiento es importante porque permite identificar problemas potenciales y limitaciones del uso de los geotextiles en las obras de Ingeniería Civil.

4.2.5.a Resistencia a sustancias químicas

Se define en términos de cambios en el peso, dimensiones, apariencia y propiedades mecánicas de las telas. Los métodos de ensaye consideran diferentes periodos de exposición para toda una variedad de sustancias con diferente grado de concentración y es

tando a temperaturas elevadas. El método D543 de la ASTM considera este aspecto bajo el título de "Resistencia de plásticos a reactivos químicos".

4.2.5.b Resistencia a variaciones de temperatura

Se refiere a la capacidad de las telas para soportar altas o bajas temperaturas sin que se vean afectadas sus propiedades, sobre todo las mecánicas.

Por lo que respecta a la resistencia a altas temperaturas, la prueba recomendada por la ASTM es la denominada D794. En ella, el calor se aplica con un horno y se regula mediante una toma de aire, siendo posible generar calor en forma continua o cíclica. En el primer caso el calor se aumenta gradualmente hasta provocar la falla, entendida como un cambio en la apariencia, peso, dimensiones o en otras propiedades, que altera al material hasta el grado de que deja de ser útil a su objetivo. Al alcanzar la falla puede tomar desde unos minutos hasta varias semanas, dependiendo de la proporción en que vaya aumentándose la cantidad de calor. Por su parte, la aplicación cíclica de calor consiste en elevar la temperatura hasta un determinado valor para luego disminuirla y volver a elevarla una y otra vez hasta que ocurra la falla.

Por lo que se refiere al efecto de las temperaturas bajas puede hacerse referencia al método D746 de la ASTM que tiene por objeto observar como se modifican las propiedades de fragilidad y de resistencia a los impactos principalmente, después de estar expuestos a un clima frío. Para ello se prueban especímenes en un aparato de impactos, después de estar sujetos a bajas temperaturas; así, su fragilidad se define como aquella temperatura para la cual fallan el 50% de los especímenes.

4.2.5.c Efecto de los rayos ultravioleta

Debido a que se ha comprobado que los rayos del sol pueden causar una rápida degradación de los geotextiles, es necesario determinar que tan susceptible puede ser cada tela a dicho efecto. La ASTM ha desarrollado el método de ensaye D1435 para evaluar esta propiedad bajo el nombre de "Intemperismo de los plásticos". Dicha prueba implica la construcción de estantes de aluminio para fijar los especímenes de tela, los cuales pueden colocarse con inclinaciones de 0,45 y 90 °, respecto a la horizontal, y con diferentes orientaciones hacia el sol. Se dejan un determinado tiempo y luego se evalúa como se modifican sus propiedades aplicando las pruebas descritas anteriormente.

4.2.5.d Resistencia a los agentes biológicos

Consiste en la capacidad de los geotextiles de tolerar la existencia de micro-organismos en el lugar de su instalación. Aunque no existen métodos de ensaye bien definidos, pueden realizarse pruebas en las que se evalúe, al menos en forma cualitativa, la afectación que sufre una tela en sus propiedades al ser expuesta a diferentes medios de micro-organismos. En experimentos de este tipo se ha observado que la permeabilidad se ve muy poco afectada, que existen pequeñas variaciones en la resistencia a tensión y que no ocurre ningún cambio estructural importante (según la espectroscopia infrarroja).

4.2.5.e Deterioro por estar bajo tierra

Actualmente no se dispone de pruebas específicas para medir ésto, sin embargo existe registro de algunas investigaciones referentes a la vida útil de los geotextiles y las experiencias indican que después de 12 años los valores de sus propiedades se ven disminuidos en un porcentaje del orden de 30 %.

4.3 Funciones y aplicaciones

En la actualidad existen muchas áreas de aplicación de los geotextiles, sin embargo, en todos los casos realizan por lo menos una de las siguientes funciones:

- 1) Separación
- 2) Refuerzo
- 3) Filtración
- 4) Drenaje

Las dos primeras tienen carácter de funciones mecánicas y las dos últimas de funciones hidráulicas.

4.3.1 Separación

Generalmente se entiende como el aislamiento de un material granular, con cierta calidad, de un suelo cohesivo o de uno formado por material granular, pero con características diferentes a las del primero. Los geotextiles sirven muy bien a este propósito debido a que presentan una superficie continua que impide totalmente el contacto entre ambos tipos de materiales.

Aunque la separación se halla catalogada como una función esencialmente mecánica, tiene influencia también en el comportamiento hidráulico del sistema formado por los dos suelos. Para visualizar ésto puede considerarse lo que sucedería al colocar una capa de material granular directamente sobre un suelo arcilloso blando. En tal situación se manifestarían simultáneamente dos procesos: por un lado, las partículas de material granular se irían incrustando sobre el suelo blando con lo cual se generarían asentamientos diferenciales, y por otro, las partículas finas del terreno natural tenderían a ascender por capilaridad hacia los espacios vacíos del material granular, obstruyéndolos por

co a poco, hasta el grado de anular su capacidad para drenar el agua del interior de su estructura (fig. 4.11.a y b).

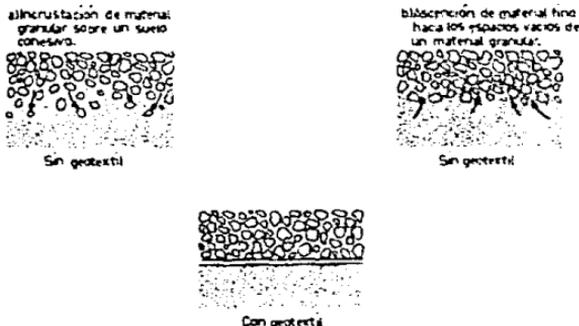


FIG. 4.11 PROCESOS IMPLICADOS EN EL USO DE UN GEOTEXTIL COMO CAPA SEPARADORA ENTRE DOS TIPOS DE SUELOS (Ref. 61)

Tal vez el ejemplo que mejor pueda ilustrar el uso de los geotextiles como capa separadora es cuando se les coloca entre un suelo con cierta resistencia y una capa de agregados pétreos, como puede ser la base de una carretera o el balasto de una vía férrea. El hecho de que el terreno de apoyo tenga cierta resistencia implica que las deformaciones no deben ser tales que lleguen a inducir esfuerzos de tensión que sean de consideración puesto que entonces la tela estaría trabajando más como refuerzo que como separadora.

Las propiedades que generalmente tendrán que ser consideradas para saber que tipo de geotextil usar en una aplicación en la cual la separación sea una de las funciones más importantes, sino es que la principal, son:

- 1) Resistencia al reventamiento
- 2) Resistencia a tensión
- 3) Resistencia a la perforación
- 4) Resistencia a los impactos

4.3.2 Refuerzo

Esta función consiste esencialmente en el mejoramiento del comportamiento mecánico de los suelos, ya sean cohesivos o granulares, mediante la incorporación de un geotextil en su masa. Esto se logra por la combinación de las características de resistencia propias de cada suelo (que les permiten soportar grandes esfuerzos de compresión) y las características de resistencia que se les atribuyen a los geotextiles (debido a las cuales son capaces de soportar grandes esfuerzos de tensión).

Para evaluar que tanto puede incrementarse la resistencia de un suelo al incluir en su estructura a un geotextil se han llevado a cabo pruebas triaxiales con muestras de suelos reforzados de distintas formas.

En la fig. 4.13 se muestran resultados de dos series de pruebas como las mencionadas, realizadas con un solo tipo de suelo, bajo presiones de confinamiento de 0.21 y 2.11 kg/cm^2 (equivalentes a 3 y 30 lbs/pulg^2), para diferentes configuraciones del sistema suelo-tela.

El suelo reforzado en ambos casos fue una arena bien graduada y compacta.

La mejoría en la resistencia al corte de los especímenes es muy notoria.

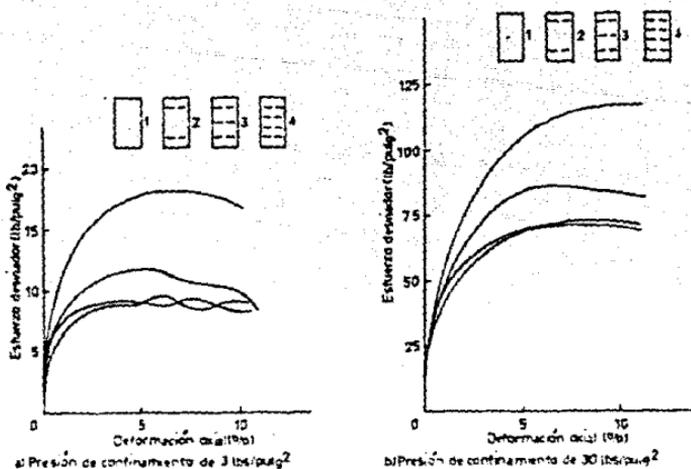


FIG. 12 RESULTADOS DE PRUEBAS TRIAXIALES QUE MUESTRAN LA INFLUENCIA DE LOS GEOTEXTILES EN LA RESISTENCIA DE UN SUELO AL COLOCARLOS DE DISTINTAS FORMAS DENTRO DE LOS ESPECIMENES (Ver 6).

Las curvas con el número 1 indican la resistencia de la arena sola.

Las curvas con el número 2 representan el comportamiento de los especímenes en los que se colocaron geotextiles tanto arriba como abajo de ellos, sin obtenerse ninguna mejoría; sin embargo, al colocar el geotextil en la parte central o en los tercios medios de los cilindros de prueba se hace evidente la contribución a la resistencia. Esto se debe a que las telas interrumpen el desarrollo de las fracturas que se generan a causa del esfuerzo cortante que actúa sobre las muestras, razón por la cual el sistema es más efectivo cuando los geotextiles se colocan en los tercios medios (curvas con el número 4) que cuando se colocan solamente en el centro (curvas con el número 3).

Considerando las diferentes aplicaciones en las que puede requerirse que los suelos presenten mayor resistencia, el refuerzo mediante geotextiles puede estar enfocado hacia alguna de los tres objetivos siguientes:

- 1) Favorecer la capacidad de carga de suelos artificiales colocados sobre un terreno blando (carreteras y vias férreas).
- 2) Contribuir a la estabilidad de taludes naturales y artificiales.
- 3) Formar muros de retención en los que se aproveche la resistencia de los geotextiles a esfuerzos de tensión (tierra - armada).

En cuanto a las propiedades de los geotextiles que deberán tomarse en cuenta para una adecuada elección de la tela a usar en cualquiera de las aplicaciones mencionadas, las que tendrán mayor relevancia serán:

- 1) Resistencia a tensión
- 2) Angulo de fricción interna del sistema suelo-tela.
- 3) Adherencia

4.3.3 Filtración

Los geotextiles pueden funcionar como un filtro que permita el paso del agua hacia el interior o el exterior de un suelo y que a la vez retenga en su lugar a las partículas que lo forman, sin embargo, para lograr ambas cosas es necesario que exista una compatibilidad entre las características hidráulicas del geotextil y las del suelo protegido. Por tal motivo, la filtración se ha definido como " el equilibrio del sistema geotextil-suelo que

permite el libre flujo de agua a través del plano de la tela, - sin pérdida de partículas finas, por un período de tiempo indefinido ".

Esta fue una de las primeras aplicaciones que les fueron reconocidas a los geotextiles, y actualmente es una de las que recibe mayor atención por parte de los fabricantes puesto que está presente en la mayoría de sus aplicaciones.

Las propiedades de los geotextiles que guardan una relación directa con su desempeño como filtros son:

- 1) Permeabilidad (fundamentalmente la que presentan en sentido normal a su propio plano, es decir, - la permitividad).
- 2) Capacidad de retención.
- 3) Susceptibilidad a la obstrucción total de sus poros.

Siendo ésta, la función hacia la cual se enfoca el presente trabajo, en el siguiente capítulo se profundiza sobre la forma en que se relacionan con ella las propiedades mencionadas; asimismo, se indica como se toman en cuenta dichas propiedades para seleccionar la tela requerida en una aplicación específica.

4.3.4 Drenaje

De manera similar a la filtración, el drenaje puede definirse como " el equilibrio entre el sistema geotextil-suelo mediante el cual es posible el flujo de agua, sin pérdida de suelo, - sobre el propio plano de manufactura de la tela ".

Esta función la realizan todos los geotextiles, aunque en un grado muy variable. Por ejemplo, una tela tejida delgada es capaz de conducir agua através de los minúsculos espacios que se crean en los puntos de cruce de las fibras o filamentos que la forman, sin embargo, la cantidad de agua es muy pequeña. Un caso muy distinto es el de las telas no-tejidas agujadas, que son por lo general gruesas, las cuales pueden conducir un caudal considerable.

Siendo el drenaje una función muy similar a la filtración, -- las propiedades que tienen importancia para ella son prácticamente las mismas que para la anterior, es decir:

- 1) Permeabilidad (pero la que presentan los geotextiles en sentido paralelo a su plano, o sea la transmisividad).
- 2) Capacidad de retención.
- 3) Susceptibilidad de sus poros a la obstrucción total.

4.4 Bases para el diseño o la elección de un geotextil

Al considerar el uso de un geotextil en cualquier obra es necesario definir las características más importantes que debe reunir para saber que tipo de tela es el más adecuado.

Debido a que cada vez existen un mayor número de aplicaciones y un número todavía más grande de geotextiles, resulta difícil decidir que tela usar para un caso específico.

La elección de la que se habla puede realizarse de acuerdo con tres criterios principales:

- 1) Diseño por costo
- 2) Diseño basado en especificaciones
- 3) Diseño por función

4.4.1 Diseño por costo

Consiste simplemente en considerar el capital disponible para la compra de los geotextiles, así como el área por cubrir con ellos, y se calcula entonces el precio unitario máximo permisible, eligiéndose aquella tela cuyo precio se encuentre más cerca del límite calculado.

No obstante que este método es muy criticable parece ser de los más empleados. Afortunadamente, la situación ha ido cambiando con el establecimiento de normas sobre el uso de geotextiles en todos los países que ahora los utilizan comúnmente.

4.4.2 Diseño basado en especificaciones

Esta forma de diseño se ha generalizado en todos aquellos países que han aceptado el uso común de estos materiales, siendo aplicable siempre que se trate con dependencias de gobierno. En tales casos existen reglamentos que consideran varias categorías de uso y establecen las propiedades que deben presentar las telas (generalmente se manejan los valores mínimos). Se comparan entonces las propiedades de los geotextiles disponibles con las establecidas en las especificaciones. Si existen varios geotextiles que pueden ser adecuados, se comparan también la disponibilidad y costo de cada uno para tomar la decisión final.

Siempre que se aplique este método debe tomarse en cuenta que las especificaciones establecen las propiedades mínimas requeridas, y que en los catálogos que proporcionan los fabricantes generalmente se señalan valores promedio de un lote o de un rollo.

4.4.3 Diseño por función

El método consiste en la identificación de la función principal que deberá realizar la tela y en el cálculo del valor requerido de las propiedades específicas de las que depende dicha función. Dividiendo ese valor entre el valor real de la propiedad del geotextil se obtendrá un factor de seguridad. Si este factor es adecuado el geotextil será aceptable. Pueden probarse un cierto número de geotextiles y luego elegirse uno con base en la mayor disponibilidad y el menor costo.

Los pasos específicos del procedimiento son los siguientes:

- 1) Valorar la aplicación particular considerando al geotextil no en forma aislada sino formando parte de un sistema.
- 2) Dependiendo de lo crítico de la aplicación, decidir que factor de seguridad sería el más adecuado (preguntándose cuáles serían las consecuencias de una falla).
- 3) Establecer cual será la función principal del geotextil.
- 4) Calcular el valor requerido de las propiedades más importantes de acuerdo con la función principal.
- 5) Obtener el valor mínimo de las mismas propiedades del geotextil evaluado (teniendo en cuenta las diferencias entre los valores mínimo y promedio de un rollo o un lote).
- 6) Calcular el factor de seguridad real a partir del valor mínimo de las propiedades de la tela dividiéndolo entre el valor de las propiedades requeridas.
- 7) Comparar el factor de seguridad obtenido en el paso 6 con el definido en el paso 2.
- 8) Si la comparación no es favorable será necesario evaluar otras telas.

- 9) De resultar un factor aceptable, habrá que verificarse si ninguna otra función es crítica también.
- 10) Cuando se encuentren varias telas que satisfagan el requisito de seguridad, se hará la elección con base en la mayor disponibilidad y el menor costo.

No cabe duda de que siguiendo este procedimiento se obtendrá el mejor resultado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Behery H.M., Application of Nonwovens in Geotextiles: Part I. - Soil Separation and Reinforcement, and Part II. Drainage and Erosion Prevention and Control, TAPPI Nonwovens Symposium, U.S.A. 1982.
2. Christopher B.R., Evaluation of Geotextiles Properties, TAPPI - Nonwovens Symposium, U.S.A. 1982.
3. Gicot O. y Perfetti J., Les Geotextiles, Concebir y Dimensionar, Rhone-Poulenc-Fibres, Department Montisese Bidin, Francia 1982.
4. Giroud J.P., Introduction to Geotextiles and their Applications, Proceedings of the first Canadian Symposium on Geotextiles, 1980.
5. Giroud J.P., Geotextile Products, Geotechnical Fabrics Report, U.S.A. 1983.
6. Koerner R.M., Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, U.S.A. 1986.
7. Manz H.M., The Elements of Classical Geotextiles and the Process by which they are manufactured, TAPPI Nonwovens Symposium, U.S.A. 1982.
8. POLYFEMT, Department Application Technique, Chemie Linz AG, Austria 1986.
9. Ramirez A.M., Los Geosintéticos y el Ingeniero de Diseño, Ferriarias del Simposio sobre Geosintéticos, S.M.E.S., México 1990.
10. SUPAC, Phillips Fibers Engineered Geotextiles, Phillips Fibers Corporation, U.S.A. 1987.

5. USO DE GEOTEXILES COMO FILTRO

5.1 Mecanismo de operación

Aunque son muchas las aplicaciones en las que los geotextiles pueden actuar como filtros, se distinguen tres casos principales:

- 1º) Cuando sirven para retener a las partículas sólidas suspendidas en un líquido.
- 2º) Cuando se utilizan en obras de drenaje y tienen como objetivo principal evacuar el agua de la masa de un suelo.
- 3º) Cuando se usan en obras de control de erosión para evitar tanto la pérdida de partículas finas como la generación de presiones hidrostáticas nocivas.

En el primer caso, el geotextil constituye una barrera permeable expuesta al flujo de un líquido, la cual no permite el paso de las partículas finas que éste transporta. Como ejemplos de tal aplicación se tienen los siguientes:

- a) Mallas para retener el material fino que transportan las corrientes de agua y evitar la formación de depósitos o el azolve de presas y canales.
- b) Mallas contenedoras del material fino proveniente del deslize de laderas naturales.
- c) Bolsas protectoras para el colado de pilotes de concreto, de los que se fabrican "in situ".

En el segundo caso, el geotextil se coloca entre el suelo del cual se quiere evacuar el agua y los elementos permeables que se utilizan para canalizarla y desalojarla (agregados pétreos, tuberías perforadas, esteras de plástico, etc.). El trabajo de la tela consiste en evitar el movimiento de las partículas del suelo --

por drenar y facilitar el paso del agua através de ella, para mejorar la eficiencia del sistema.

Los ejemplos que existen para ilustrar esta aplicación de te- las filtrantes son muchos:

- a) En subdrenes y drenes de penetración para vías terrestres.
- b) En pozos para extracción de agua o para abatimiento del nivel freático.
- c) En drenes para muros de retención.
- d) En obras de drenaje de presas de tierra y enrocamiento.

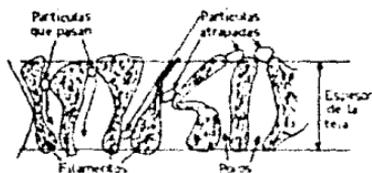
Por último, en el tercer caso, cuando los geotextiles se usan en obras de control de erosión como las que se construyen en las márgenes de los ríos o las costas, generalmente se colocan sobre el suelo que les sirve de apoyo y al cual protegen, para evitar - el arrastre de partículas finas a través de los huecos formados - en su estructura, a menos que se trate de obras muy impermeables, como tablestacas o muros rígidos, ya que entonces se colocan en - su parte posterior y ejercen una función más bien de drenaje, la cual queda comprendida en el segundo caso.

Aunque aparentemente los geotextiles tienen la misma utilidad en las obras de drenaje que en las obras de control de erosión, - existen ciertas diferencias fundamentales que hacen que el meca- nismo de operación sea mucho más complejo.

Por lo general, el flujo que se maneja en todas las obras de - drenaje ocurre en una sola dirección (del suelo hacia el filtro) y es prácticamente constante, mientras que en las obras de control de erosión el sentido del flujo es casi siempre alternado (el a- gua pasa hacia uno y otro lado del filtro) y además su magnitud - es muy variable.

Por lo complejo que resulta el estudio del comportamiento filtrante de los geotextiles para las condiciones de un flujo reversible y turbulento, se ha optado primero por dirigir la investigación hacia la comprensión del fenómeno de la filtración, teniendo en cuenta las condiciones más simples, es decir, considerando un flujo constante y unidireccional.

Bajo tales circunstancias, se ha podido comprobar que inmediatamente después de la instalación del geotextil, las partículas finas del suelo que se encuentran más cerca de la tela emigran hacia los poros que ésta presenta debido al flujo que se establece en el suelo y, aunque algunas logran pasar a través de ella, otras se quedan atrapadas (fig. 4.1.a); simultáneamente, las partículas que son más grandes que los poros se acomodan contra su superficie formando una serie de arcos (fig. 4.1.b). Conforme el agua continua fluyendo a través del geotextil, van siendo atrapadas cantidades cada vez mayores de partículas finas en los arcos hasta que ya no permiten el paso de ninguna. El tiempo requerido para que ésto suceda puede ser, dependiendo de ciertos factores, de 4 a 5 meses a partir de la instalación del geotextil.



a) Mecanismo de filtración por el cual una fracción de partículas obstruye algunos poros de la tela, existiendo siempre aberturas sin obstruir.



b) Mecanismo por el cual las partículas de suelo forman arcos por debajo de la tela entre los hilos.

FIG. 51 PROCESOS IMPLICADOS EN EL COMPORTAMIENTO FILTRANTE DE LOS GEOTEXTILES (RM. 71).

A cierta distancia de los arcos que se forman sobre la superficie de la tela se encuentra una zona en la masa del suelo protegido en la que se lleva a cabo un reacomodo de partículas hasta que llega a formarse un filtro natural (fig. 5.2), denominado en inglés "cake". Este proceso es muy similar a la acción filtrante auto-inducida del material granular que se coloca en los pozos. El geotextil actúa esencialmente como un catalizador que propicia la formación del filtro natural de suelo, el cual forzosamente es compatible con la parte de suelo no modificada.

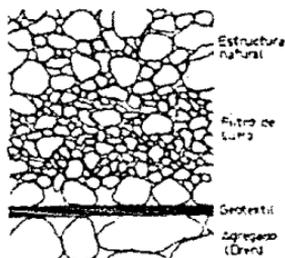


FIG. 5.2 ACOMODO DE PARTICULAS QUE PROMUEVE LA FORMACION DE UN FILTRO NATURAL EN EL SUELO (RAC 71)

Con el filtro formado en la masa del suelo se drena en forma efectiva el agua proveniente de la parte que no ha sido modificada, mientras el geotextil retiene en su lugar a las partículas que constituyen la estructura del estrato drenante. Es así que la función filtrante implica, además de una permeabilidad adecuada, una buena capacidad para retener partículas finas.

Las características del filtro natural que se forma en el suelo protegido dependen de factores como:

- 1) Propiedades físicas y mecánicas del geotextil (tamaños de los poros y su distribución, porosidad, espesor, compresibilidad del tejido).
- 2) Características del suelo por proteger (tamaños de las partículas y su distribución, porosidad, permeabilidad y cohesión).
- 3) Esfuerzos de tensión y compresión impuestos al suelo.
- 4) Condiciones hidráulicas (flujo laminar o turbulento, en una sola dirección o reversible).

Este último factor es de vital importancia ya que bajo un flujo reversible y/o turbulento pueden no llegar a formarse los arcos, incrementándose en forma notable la migración de partículas finas.

5.2 Requerimientos generales

Para lograr un buen funcionamiento filtrante de los geotextiles debe cumplirse con los mismos requisitos establecidos para filtros granulares.

5.2.1 Requisito de permeabilidad

Después del período inicial de inestabilidad (por la formación del filtro natural en el suelo) la permeabilidad del sistema debe ser relativamente constante con el paso del tiempo (fig. 5.3).

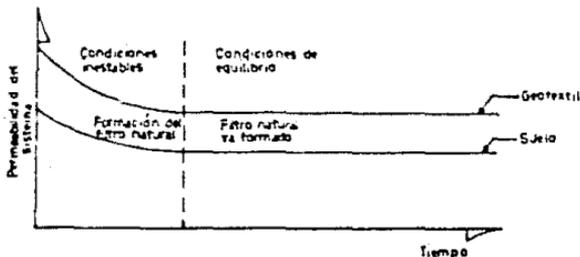


FIG. 5.3 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL REQUISITO DE PERMEABILIDAD PARA LOS FILTROS DE GEOTEXTILES (Art. 6.1)

5.2.2 Requisito de retención

Una vez concluida la formación del filtro natural, el suelo -
protegido no debe continuar siendo erosionado (fig. 5.4).

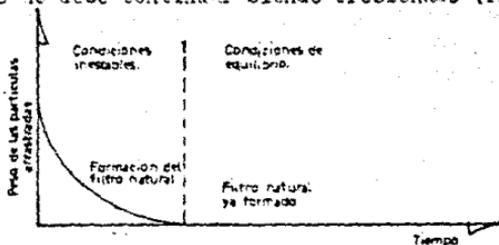


FIG. 5.4 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL REQUISITO DE RETENCIÓN PARA LOS FILTROS DE GEOTEXILES (REF. 6.1)

5.3 Propiedades que determinan la eficiencia

Para satisfacer las condiciones anteriores debe existir una -
compatibilidad entre el suelo por proteger y el geotextil utili-
zado para ello. La forma de saber si una tela es compatible o no
con un determinado tipo de suelo es, a través de sus propiedades.

Las dos propiedades de los geotextiles que tienen mayor in-
fluencia en la formación de un filtro natural estable son su per-
mitividad (K) y su tamaño equivalente de poros (EOP). La primera
define si tienen o no la capacidad para permitir un flujo de a-
gua suficiente a través de ellos, aún después de la obstrucción
de un cierto número de sus poros; y la segunda determina el tam-
ño máximo de las partículas de suelo que pueden traspasarlos. Aun-
que ya se habló de estas propiedades en el capítulo 1, es neces-
rio ahondar un poco más respecto a la forma adecuada de evaluar-
las puesto que de ello dependerá en gran parte el éxito en la a-
plicación de los criterios de diseño.

5.3.1 Permitividad

Como se mencionó antes, la forma más común de evaluarla es a partir de la ley de Darcy, mediante el uso de las expresiones -- 4.3' ó 4.3". Haciéndolo así, resulta fácil relacionarla con la -- permeabilidad del suelo protegido, sin embargo existen dos desventajas importantes: en primer lugar, la ley de Darcy es aplicable solamente bajo condiciones de flujo laminar, situación que difícilmente se da en la realidad; y en segundo lugar, en las pruebas para evaluar la permeabilidad a partir de la ley de Darcy, generalmente la carga hidráulica aplicada es muy grande comparada con el espesor que tienen los geotextiles (hasta 200 veces más grande), por lo que cualquier variación en el espesor del geotextil o en su posición puede traducirse en una gran variación del gradiente hidráulico y a la vez del valor de la permitividad.

Por lo anterior, ha disminuido el uso de la ley de Darcy para determinar el coeficiente de permeabilidad y se ha optado por seguir otros procedimientos.

El laboratorio de hidráulica de la Universidad de Delft, Holanda, sugiere el uso de una forma modificada de la ley de Darcy que tome en cuenta la condición de flujo turbulento.

La expresión recomendada es:

$$\frac{k_p}{t} = \frac{\sigma^n}{A \Delta h} \quad \dots \text{ (Ec. 5.1)}$$

donde,

- k_p = Coeficiente turbulento de permeabilidad
- n = Factor que oscila entre 1 y 2, el cual indica el grado de turbulencia del flujo de agua que pasa através del geotextil. Para flujos completamente laminares $n=1$ y para muy turbulentos $n=2$.

No obstante que este método parece ser más adecuado, presenta también sus inconvenientes: a pequeñas variaciones en el espesor de los geotextiles o en su edición corresponden variaciones importantes en el gradiente hidráulico, y a la vez en el coeficiente "K_f"; por otra parte, generalmente resulta muy complejo determinar el valor de "n"; y la desventaja más importante es que el coeficiente "K_f" que se obtiene no puede ser comparado directamente con el coeficiente de permeabilidad del suelo por proteger.

Otro procedimiento alternativo consiste en evaluar la permeabilidad en forma indirecta, midiendo simplemente el volumen de agua que pasa a través de un geotextil por unidad de área y por unidad de tiempo, bajo una carga constante. De esta manera se obtiene un valor que es independiente del tipo de flujo. Sin embargo, persiste el problema de que la permeabilidad así evaluada no puede compararse directamente con el coeficiente de permeabilidad del suelo por proteger. Dicho inconveniente ha tratado de ser superado estableciendo una relación entre esta permeabilidad aparente y el tamaño equivalente de poros (EOP) de los geotextiles (fig. 5.5). Así, una vez que se tenga definido el valor de la segunda, después de considerar las características granulométricas del suelo por proteger, podrá determinarse el valor requerido de la primera, en función no del coeficiente de permeabilidad del suelo sino del tamaño máximo de sus partículas.

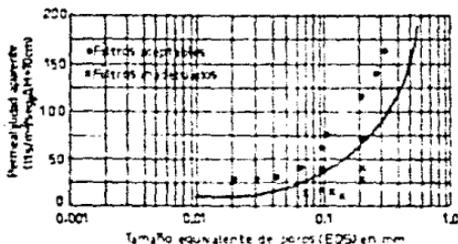


FIG.5.5 RELACION ENTRE EL TAMAÑO EQUIVALENTE DE POROS (EOP) Y LA PERMEABILIDAD DE LOS GEOTEXTILES SEGUN CHRIS RAWLSON (RM 61)

Más adelante, en este mismo capítulo, se habla en forma específica de los criterios existentes para determinar el valor requerido de ambas propiedades.

5.3.2 Tamaño equivalente de poros (EOP)

Como ya se explicó antes, esta propiedad se evalúa mediante una prueba de cribado, efectuada con pequeñas bolitas de vidrio de diferente tamaño, las cuales se hacen pasar a través de las telas. De la prueba puede obtenerse una gráfica como la de la fig. 5.6.

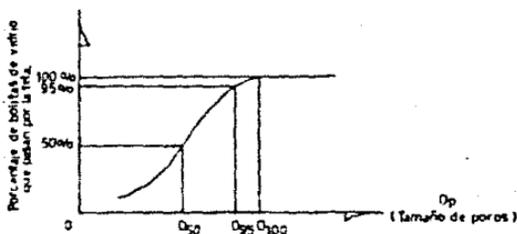


FIG. 5.6 CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE POROS EN UN GEOTEXTIL (Abt. 3).

El principio de obtención de esta gráfica es similar y hasta cierto punto equivalente al de la curva de distribución granulométrica de un suelo.

Sería ideal para el diseño poder contar siempre con esta curva de distribución de tamaños de los poros de un geotextil, sin embargo, cabe señalar que la información que proporciona la curva completa es poco confiable debido a que la prueba de cribado no es perfectamente reproducible. Por tal razón se ha convenido en usar solamente el valor más representativo de toda la distribución.

Siendo la parte superior de la curva donde parece haber mejor concordancia entre las pruebas, se ha optado por considerar como valor más representativo el tamaño de poros con el que se permite el paso del 95 % de las bolitas (O_{95}), al cual se ha denominado "tamaño equivalente de poros" (EOS).

Para que la evaluación de esta propiedad sea más precisa debe tomarse en cuenta el efecto que tienen sobre ella las cargas actuantes.

La forma en que se ha propuesto tener en cuenta la influencia de esfuerzos de compresión en el tamaño equivalente de poros de los geotextiles no-tejidos agujados, que son los que más se usan como filtros y a la vez los más compresibles, es haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\frac{O_{95} + d_f}{O_{95}' + d_f} = \sqrt{\frac{H_E}{H_E'}} \quad \dots \text{(Ec. 5.2)}$$

donde,

O_{95} = Tamaño equivalente de poros, correspondiente al espesor H_E inicial (sin carga) del geotextil, en mm.

O_{95}' = Tamaño equivalente de poros, correspondiente al espesor H_E' modificado (con sobrecarga) del geotextil, en mm.

d_f = Diámetro de los filamentos, en mm.

De dicha expresión se deriva que:

$$O_{95}' = \frac{\sqrt{\frac{H_E'}{H_E}}}{O_{95} + d_f} - d_f \quad \dots \text{(Ec. 5.3)}$$

5.4 Desarrollo de criterios para la elección

Los criterios más acertados para el diseño de filtros de geotextiles son los que toman en cuenta las propiedades de los mismos que tienen mayor influencia en su comportamiento, como son: - la permitividad y el tamaño equivalente de poros, lo que significa que todos ellos se basan en el método de diseño por función.

El mayor problema en la aplicación de dicho método estriba en determinar el valor exacto de las propiedades requeridas, situación que ha motivado el desarrollo de tres corrientes principales:

- 1) Adecuación de las reglas clásicas para filtros granulares.
- 2) Aplicación de una teoría especial para geotextiles.
- 3) Uso de los resultados obtenidos con pruebas en modelos.

A partir de estas tres posturas se han derivado todas las recomendaciones que actualmente existen para el diseño de los filtros de geotextiles.

5.4.1 Adecuación de las reglas clásicas para filtros granulares

Para poder aplicar dichas reglas al diseño de un filtro con geotextiles es necesario establecer una equivalencia entre la distribución de tamaños de las partículas de un suelo granular y la distribución de tamaños de los poros de una tela.

Un intento en este sentido parte de lo establecido por Atterberg respecto al tamaño promedio de los espacios vacíos que se forman entre las partículas de un suelo granular:

$$d_{\text{filtro}} = 0.2 A D_{10(\text{suelo})} \dots \text{(Ec. 5.4)}$$

donde,

$d_{p\text{filtro}}$ = Diámetro promedio de los espacios vacíos
en el material granular usado como filtro.

$d_{10\text{filtro}}$ = Diámetro correspondiente a la abertura de
la malla a través de la cual pesa el 10 %,
en peso, del material usado como filtro.

Si en los geotextiles, $d_{p\text{filtro}} = \text{EOS}$ o AOS

y en un suelo cualquiera, $D_{15} \pm D_{10}$

se sigue que:

$$\text{EOS} = 0.2 \times D_{15\text{filtro}} \quad \dots (\text{Ec. 5.5})$$

$$\text{o bien, } D_{15\text{filtro}} = \frac{\text{EOS}}{0.2} = 5 \text{ EOS}$$

Sustituyendo este valor de D_{15} en las dos reglas clásicas para el diseño de filtros granulares (Ecs. 3.3 y 3.4) se logra su adaptación para los geotextiles:

1) Para prevenir la tubificación en el suelo protegido,

$$\text{EOS} < D_{35} \text{ del suelo protegido } \dots (\text{Ec. 5.6})$$

2) Para tener una permeabilidad suficiente en el filtro,

$$\text{EOS} > D_{15} \text{ del suelo protegido } \dots (\text{Ec. 5.7})$$

En arenas y gravas gruesas, el requisito que usualmente es más crítico para el diseño es el de la permeabilidad y en el caso de arenas finas o limos es más importante el requisito de retención.

Por lo que respecta a la restricción adicional para el coeficiente de uniformidad del material granular usado como filtro, para poder hacerla aplicable a los geotextiles es necesario establecer una relación entre los diámetros D_{50} , D_{30} y D_{10} .

Asumiendo que la curva de distribución granulométrica en un suelo es una recta en el plano semilogarítmico y valiéndose de lo expuesto por Atterberg se sigue que:

$$D_{50} \text{ filtro} = 5 \text{ EOS} \times Cu^{0.7} \quad \dots (\text{Ec. 5.9})$$

Entonces, la recomendación adicional para asegurar la retención de partículas con los filtros de geotextiles es que:

$$5 \text{ EOS} \times Cu^{0.7} \leq (25 \text{ ó } 7) D_{50} \text{ del suelo protegido}$$

O bien,

$$\text{EOS} \leq \frac{(25 \text{ ó } 7) D_{50} \text{ del suelo protegido}}{5 Cu^{0.7}} \quad \dots (\text{Ec. 5.9})$$

El número 25 se aplica cuando la estructura del geotextil utilizado se asemeja a la de un suelo bien graduado ($Cu=3$), es decir, si se trata de una tela no-tejida. En tal caso la expresión se reduce a lo siguiente:

$$\text{EOS} \leq 2.3 D_{50} \text{ del suelo protegido} \quad \dots (\text{Ec. 5.9}')$$

Por otro lado, si el geotextil utilizado se asemeja a un suelo de granulometría uniforme ($Cu=1$), el límite es el número 7 y la expresión que resulta es:

$$\text{EOS} \leq 1.4 D_{50} \text{ del suelo protegido} \quad \dots (\text{Ec. 5.9}''')$$

Procediendo en forma similar, es posible también adaptar a los geotextiles la recomendación mencionada en el capítulo 3 para el diseño de filtros granulares cuya función sea proteger suelos predominantemente cohesivos (Ec. 3.6).

$$\text{Sabido que, } D_{15} \text{ filtro} = \frac{d_{pr}}{0.2} = \frac{\text{EOS}}{0.2} = 5 \text{ EOS}$$

La restricción es que:

$$\text{EOS} < 0.08 \text{ mm} \quad \dots (\text{Ec. 5.10})$$

Si bien resulta válido considerar la misma base teórica de las reglas clásicas para filtros granulares en el desarrollo de un criterio para el diseño de filtros de geotextiles, es importante señalar que las recomendaciones obtenidas deben manejarse con cierta reserva puesto que no existe todavía una experiencia suficiente como para asegurar su efectividad. Antes de que tales reglas fueran totalmente aceptadas para el diseño de filtros granulares tuvieron que pasar muchos años de experimentación, así que para que sean igualmente aplicables a los geotextiles tendrán que irse perfeccionando a través de una adecuada combinación de elementos teóricos y prácticos.

5.4.2 Aplicación de una teoría especial para geotextiles

Debido a que en muchos de los estudios realizados sobre filtración se ha observado que el comportamiento de los geotextiles no se ajusta completamente a la teoría desarrollada para los filtros granulares, se ha propuesto el uso de una nueva teoría, desarrollada especialmente para los geotextiles, que describa mejor el mecanismo de filtración.

Al igual que con los filtros granulares resulta difícil formular una teoría apegada a la realidad por dos razones fundamentales:

1) La gran variedad de fenómenos involucrados como:

- El flujo de agua
- La capilaridad
- La erosión
- La variación del comportamiento mecánico del suelo en función del contenido de agua y de las presiones de poro.
- Las interacciones químicas y eléctricas entre el filtro y las partículas del suelo protegido.

2) La cantidad tan grande de parámetros que intervienen en dichos fenómenos:

- Características geométricas (forma de la masa del suelo, dirección que sigue el flujo y su variabilidad).
- Elementos mecánicos (la gravedad y los esfuerzos actuantes).
- Propiedades de los elementos involucrados, como las del agua (Composición, densidad, viscosidad), las que presentan las partículas del suelo protegido (forma, tamaño, distribución, peso específico, naturaleza química), las propiedades generales de éste (permeabilidad, ángulo de fricción interna y/o cohesión), las propiedades de los elementos del filtro, es decir, de las fibras sintéticas (las mismas de las partículas del suelo), y por último, las propiedades generales del mismo (espesor, permeabilidad, compresibilidad).

En la actualidad se está todavía muy lejos de contar con una teoría lo suficientemente completa, que considere todos los fenómenos y parámetros mencionados. Como en el caso de los filtros granulares es necesario hacer una simplificación del proceso y considerar solamente los aspectos fundamentales.

A continuación se exponen las ideas a partir de las cuales se han establecido los requisitos mínimos para los filtros de geotextiles en la Sociedad Internacional de Geotextiles, encabezada por el Dr. Jean Pierre Viroud.

5.4.2.a Requisito de permeabilidad

Como en el caso de los filtros granulares, la permeabilidad requerida en los geotextiles depende de la que presenta el suelo --

por proteger, así que para definirla es necesario establecer una relación entre ambas.

La condición principal que tiene que cumplir la permeabilidad del geotextil para que pueda considerarse adecuada es que ésta no debe causar una reducción en el flujo de agua que pueda traducirse en un incremento importante de la presión de poro en el suelo protegido puesto que ello podría llevarlo a la falla.

Para limitar entonces el valor de la permeabilidad de forma que la alteración en la masa del suelo sea mínima es necesario partir de la expresión que existe para evaluar el incremento en la presión de poro que forzosamente tiene que ocurrir en su interior al interponer una barrera, como lo es el geotextil, que controle el flujo de agua.

Dicha expresión puede deducirse considerando las condiciones de flujo inicial y final representadas en las figs. 5.7.a y 5.7.b.

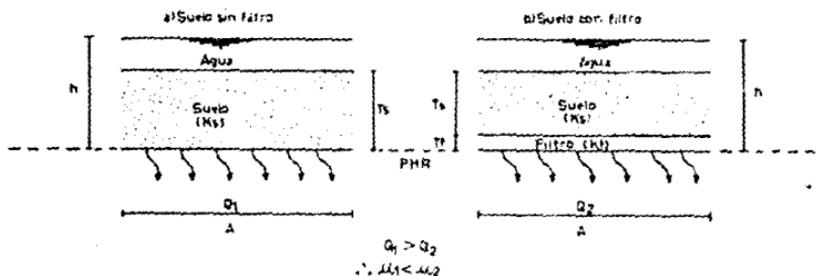


FIG. 5.7 ALTERACION DEL FLUJO DE AGUA Y DE LA PRESION DE PORO EN UN SUELO AL COLOCAR UN FILTRO (Ref. 31)

Según la ley de Darcy el flujo por unidad de área en el primer caso está dado por:

$$q = \frac{h K_s}{T_s} \quad \dots \text{(Ec. 5.11)}$$

Y al incluir al geotextil:

$$q = \frac{h}{\frac{T_f}{K_f} + \frac{T_s}{K_s}} \quad \dots \text{ (Ec. 5.12)}$$

Valiéndose de las dos expresiones anteriores y aplicando la definición de presión de poro se obtiene la fórmula siguiente:

$$\Delta U = \left(\frac{h}{1 + \frac{T_s K_f}{T_f K_s}} - T_f \right) \gamma_w g \quad \dots \text{ (Ec. 5.13)}$$

donde,

ΔU = Incremento de la presión de poro en la masa del suelo protegido debido a la reducción del gasto unitario por la colocación del filtro de geotextil (Kg/m^2)

h = Carga hidráulica inicial (m)

T_s y T_f = Espesores del suelo protegido y del filtro, respectivamente (m)

K_s y K_f = Coeficientes de permeabilidad del suelo protegido y del filtro, respectivamente (m/seg)

γ_w = Peso volumétrico del agua (Kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/seg^2)

Para que el incremento de la presión de poro sea lo más pequeño posible la relación $\frac{T_s K_f}{T_f K_s}$ debe tener un valor muy grande, o bien su recíproco debe tender a cero, es decir:

$$\frac{T_f K_s}{T_s K_f} \rightarrow 0$$

En la experiencia geotécnica se considera que una alteración en las características de un suelo es despreciable cuando ésta no modifica su valor en más de un 10%, con lo cual se recomienda que el valor límite para esta relación sea igual a 0.1.

Si además se considera la aplicación de un factor de seguridad de 10 el límite se reduce a 0.01, y la restricción final queda como sigue:

$$\frac{e' k_s}{e s k_f} < 0.01 \quad \dots \text{(Ec. 5.14)}$$

En esta expresión, el valor de e' es del orden de 1 m para filtros granulares y de 1 a 10 mm para geotextiles (siendo lo más recomendable considerar el límite superior ya que así estamos del lado de la seguridad). Por su parte, el valor de $e s$ se redondea al espesor del suelo hasta el cual se considera que no afectado el flujo de agua por la presencia del filtro. Un valor razonable para este espesor es de 10 m.

Tomando en cuenta el valor de los parámetros involucrados, de la expresión anterior se derivan los siguientes requisitos de permeabilidad:

$$k_f > 10 k_s \quad (\text{filtros granulares}) \quad \dots \text{(Ec.5.15)}$$

$$k_f > k_s/10 \quad (\text{filtros de geotextiles}) \dots \text{(Ec.5.16)}$$

De acuerdo con el primero de estos requisitos, el coeficiente de permeabilidad de un suelo granular debe ser 10 veces más grande que el coeficiente de permeabilidad del suelo por proteger. Tal restricción resulta bastante similar a la regla clásica expuesta con anterioridad, según la cual la permeabilidad de los filtros granulares debe ser de 16 a 25 veces mayor que la del suelo por proteger, con lo que se verifica en cierta forma la validez de este análisis.

Por lo que se refiere a los filtros de geotextiles, es suficiente con que éstos presenten una permeabilidad que sea mayor que la décima parte de la permeabilidad del suelo por proteger. Esto será aplicable siempre y cuando dicho suelo no sea muy permeable o presente un porcentaje muy bajo de finos (menor de 20%),

ya que en tales casos la permeabilidad del geotextil tendrá que ser mucho mayor para disipar en forma más rápida la presión hidrostática y evitar que se obstruyan sus poros.

5.4.2.b Requisito de retención

En este inciso se indica ahora la forma en que debe limitarse el vaso de partículas finas a través de un geotextil que sirva como filtro de protección.

La capacidad de un filtro para retener a un suelo depende de la estabilidad que presente la estructura de éste último. Dicha estabilidad esta gobernada por los siguientes factores:

- 1) Las propiedades mecánicas del suelo
- 2) Las características geométricas del sistema geotextil-suelo.
- 3) Las fuerzas actuantes (fuerza hidráulica de arrastre, fuerza de gravedad, cargas externas, fuerzas de interacción entre el suelo y el filtro).

Como se indicó antes, el tratar de considerar todos los parámetros que intervienen en el fenómeno sería muy complejo, así que deben hacerse varias simplificaciones.

Como se sabe, las propiedades de los suelos de las que dependen de la estabilidad de su estructura son: por un lado, la cohesión (que gobierna la atracción entre partículas) y por otro la compactación y la distribución granulométrica (que determinan la tracción entre partículas). En este análisis solamente se toman en cuenta las dos últimas, que son propias de los suelos granulares. No se considera el caso de los suelos cohesivos puesto que son más estables ante la presencia de un flujo de agua.

Las características geométricas del sistema geotextil-suelo que se consideran son: el tamaño y la forma de las partículas -

del suelo protegido y de los poros del geotextil. Por lo que a la forma se refiere, cada partícula es caracterizada por una sola dimensión (se supone que todas son esféricas). Análogamente, se considera que todos los poros del geotextil tienen la misma forma (de orificios circulares).

La fuerza hidráulica de arrastre, que es proporcional al gradiente, juega un papel muy importante, pero es difícil de evaluar. Por tal motivo es necesario suponer un valor más o menos conservador. Se considera entonces que esta fuerza es lo suficientemente grande para mover a todas aquellas partículas que no estén en contacto con los elementos sólidos del filtro o que no se encuentren confinadas dentro de la estructura del suelo. Sin embargo, no se prevé el caso extremo de una estructura de suelo que sea destruida sistemáticamente por un flujo de agua turbulento y alternado. Dicha situación sería similar al proceso de cribado en el que todas las partículas que tienen un tamaño menor que las aberturas de la malla, al estar siendo agitadas en forma continua, terminan por pasar a través de ella.

La fuerza de gravedad y las cargas externas generalmente contribuyen a una mayor estabilidad de los suelos granulares (se excluyen las vibraciones y los impactos), porque aumentan la fricción entre partículas. Como éstas no afectan el mecanismo de filtración no se consideran en el análisis (lo cual resulta ser una actitud conservadora en la mayoría de los casos).

Las fuerzas de interacción que existen entre el filtro y el suelo protegido son: La atracción físico-química (que en los suelos granulares es prácticamente despreciable) y la fricción que existe por el contacto entre el suelo y el filtro. Para considerar el efecto de estas fuerzas en la estabilidad de la estructura del

suelo, se supone que tienen un valor tal que hacen que las partículas que se encuentran en contacto con los elementos sólidos del filtro sean perfectamente inmóviles. En otras palabras, se considera que las únicas partículas que pueden moverse (a causa del flujo de agua) son aquellas que se encuentran frente a los poros del geotextil y las que están inmediatamente atrás de ellas.

Con todas las simplificaciones anteriores, el fenómeno se convierte en un problema geométrico, en el que intervienen únicamente los siguientes parámetros:

- El tamaño de las partículas del suelo protegido y el de los poros del geotextil.
- La trabazón de las partículas del suelo (que depende del coeficiente de uniformidad y de la compacidad relativa).

Cabe señalar que en las reglas clásicas para filtros granulares solamente se toma en cuenta el primero de estos aspectos y se desprecia el segundo.

Dependiendo de los valores que tengan el coeficiente de uniformidad y el índice de compacidad relativa del suelo por proteger, el requisito de retención para los filtros de geotextiles podrá - considerar dos casos distintos, cada uno con dos variantes:

- 1) Suelos con una variedad no tan grande en el tamaño de sus partículas ($1 < C_u \leq 3$), compactos ($C_r > 65\%$) o en estado suelto ($C_r \leq 35\%$).
- 2) Suelos con una gran variedad de tamaños en sus partículas ($C_u > 3$), compactos ($C_r > 65\%$) o en estado suelto ($C_r \leq 35\%$).

CASO 1 ($1 < Cu \leq 3$)

Se trata de suelos con la cantidad óptima de partículas de cada tamaño, en los que existe un número reducido de espacios vacíos, - por lo que en general su estructura es estable. Por tanto, en este caso se requiere únicamente que el filtro retenga a las partículas más grandes que se encuentran cerca de él para que el suelo entero conserve su estabilidad.

a) Suelos compactos ($Cr > 65\%$)

Tratándose de este tipo de suelos es necesario que por lo menos se muevan dos partículas en forma simultánea para que su estructura se vuelva inestable (fig. 5.3.a); así que es suficiente con que se limite el tamaño de los poros del geotextil para que no permitan el paso de dos de las partículas más grandes, es decir:

$$EOS < 2 d_{max} \quad \dots \text{(Ec. 5.17)}$$

En estricto sentido, el tamaño máximo de las partículas de un suelo granular es el correspondiente al diámetro d_{100} en la curva granulométrica, sin embargo, cabe señalar que para que dicho valor pueda considerarse representativo debe ser el que se obtenga a partir de la tangente que mejor se ajuste a la parte central de dicha curva, como si se considerara que ésta fuera una recta. De tal suposición se desprende que es posible relacionar el diámetro máximo correspondiente a esa tangente con el coeficiente de uniformidad - ya que, como se sabe, este coeficiente es una medida de la pendiente de la parte recta de la curva granulométrica, la cual se ha supuesto que se encuentra entre los diámetros d_{60} y d_{10} , pero siendo toda recta los puntos extremos para evaluarlo podrían ser d_{100} y d_{50} , es decir:

$$Cu = \frac{d_{100}}{d_{50}} \quad \text{(Coeficiente de uniformidad 'línea')}$$

de donde, $d_{100} = Cu \ d_{50}$

y sustituyendo en la Ec. 5.17,

$$EOS < 2 \ Cu \ d_{50} \quad \dots \text{ (Ec. 5.18) }$$

b) Suelos en estado suelto ($Cr \leq 35\%$)

En este caso, con que una de las partículas pueda reverse, la estructura se volverá inestable (fig. 5.8.b); así que el requisito para éstos es más estricto:

$$EOS < Cu \ d_{50} \quad \dots \text{ (Ec. 5.18') }$$

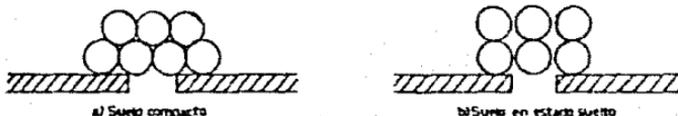


FIG. 5.8 INFLUENCIA DE LA COMPACTACION DE UN SUELO EN LA CAPACIDAD DE RETENCION DE UNA TELA FILTRANTE (Ref. 3)

CASO 2 ($Cu > 3$)

Se trata de suelos en los que la distribución de partículas es tan dispersa que no es posible obtener una buena trabazón, o sea - que aunque hay variedad de tamaños no se tienen las cantidades óptimas de cada uno. Como en éstos puede existir un número muy importante de partículas finas, el filtro para protegerlos debe diseñarse tomando en cuenta el tamaño d_x , correspondiente al máximo diámetro de las partículas que predominan.

a) Suelos compactos ($Gr > 5\%$)

El requisito de retención para la fracción fina de un suelo compacto es:

$$e_{CS} < 2 d_x \quad \dots \text{(Ec. 5.19)}$$

En esta expresión, d_x equivale al valor de d_{100} , que como antes se mencionó puede relacionarse con el coeficiente de uniformidad - 'lineal', en cuyo cálculo se consideró solamente una parte de la línea recta a la que se ajusta la curva granulométrica, sin embargo, como en este caso la distribución de tamaños es más dispersa, hay que considerar la recta completa.

Así se tiene que si, $C_u = \frac{d_{100}}{d_{50}}$ en la mitad superior

$$C_u = \frac{d_{50}}{d_0} \quad \text{en la mitad inferior}$$

y relacionando ambos, $C_u = \left(\frac{d_{100}}{d_{50}}\right) \left(\frac{d_{50}}{d_0}\right) = \frac{d_{100}}{d_0}$

de donde, $d_{100} = C_u^2 d_0$

Sustituyendo en la Ec. 5.19,

$$e_{CS} < 2 C_u^2 d_0 \quad \dots \text{(Ec. 5.20)}$$

Considerando ahora el límite superior del coeficiente de uniformidad ($C_u = 3$),

$$e_{CS} < 18 d_0 \quad \dots \text{(Ec. 5.20')}$$

pero como,

$$d_0 = \frac{d_{FC}}{C_u}$$

$$e_{CS} < 18 \frac{d_{FC}}{C_u} \quad \dots \text{(Ec. 5.21)}$$

b) Suelos en estado suelto (Cr > 35%)

Tratándose de la fracción fina de un suelo en estado suelto, la expresión anterior tendrá que dividirse entre dos, por las razones ya expuestas en el caso anterior, quedando lo siguiente:

$$EOS < 9 \frac{d_{50}}{Cu} \quad \dots \text{ (Ec. 5.21')}$$

En la tabla 5.1 se presenta un resumen del análisis realizado.

S U E L O	COMPACTIDAD	LIMITE PARA EL TAMAÑO EQUIVALENTE	
	RELATIVA	DE POROS DEL GEOTEXTIL (EOS)	
	(%)	$1 < Cu \leq 3$	$Cu > 3$
Compacto	$Cr > 65$	$EOS < 2 Cu d_{50}$	$EOS < \frac{18}{Cu} d_{50}$
Mediamente compacto	$35 \leq Cr < 65$	$EOS < 1.5 Cu d_{50}$	$EOS < \frac{13.5}{Cu} d_{50}$
En estado suelto	$Cr \leq 35$	$EOS < Cu d_{50}$	$EOS < \frac{9}{Cu} d_{50}$

TABLA 5.1 REQUISITOS DE RETENCIÓN PARA LOS FILTROS DE GEOTEXTILES EN FUNCIÓN DE LA COMPACTIDAD RELATIVA (Cr) Y EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (Cu) DEL SUELO POR PROTEGER (U_m). 31.

Estos mismos requisitos se muestran en forma esquemática en la fig. 5.9.

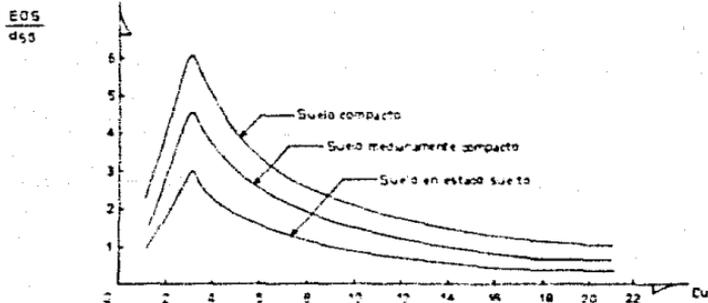
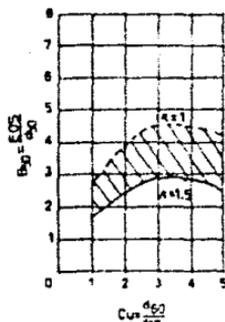


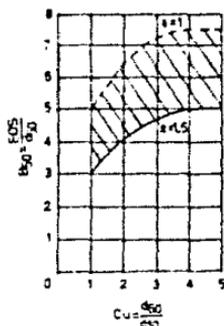
FIG. 5.9 REQUISITOS DE RETENCIÓN PARA FILTROS DE GEOTEXTILES (U_m). 31.

Entre los experimentos que sirven de apoyo a este criterio, pueden mencionarse los realizados por Schober y Teindl. Estos investigadores establecieron tres diferentes formas de prevenir la tubificación en suelos granulares cuando éstos se protegen con filtros de geotextiles. Basados en el hecho de que es menos probable la obstrucción de los poros cuando se protege a un suelo bien graduado, determinaron una relación entre el tamaño equivalente de poros de los geotextiles (considerado como la abertura O_{90}) y el coeficiente de uniformidad del suelo por proteger. Dicha relación está influenciada también por el valor del tamaño promedio de las partículas del suelo (d_{50}).

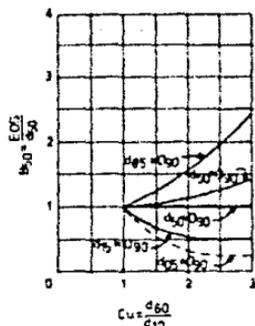
En la fig. 5.10 se muestran las curvas de diseño recomendadas por Schober y Teindl para evitar la tubificación en el suelo protegido, las cuales incorporan un factor de seguridad (n).



a) Geotextiles tejidos y no-tejidos con un espesor menor que 1mm, bajo un flujo constante de agua.



b) Geotextiles no-tejidos apilados con un espesor mayor de 2mm, bajo un flujo constante de agua.



c) Geotextiles sujetos a un flujo turbulento y alternado.

FIG. 5.10 CRITERIOS RECOMENDADOS POR SCHOBER Y TEINDL PARA DEFINIR LA CAPACIDAD DE RETENCION DE LOS FILTROS DE GEOTEXTILES ($n=1.5$).

Al parecer, los resultados que se obtienen con los geotextiles no-tejidos agujados se aproximan bastante a la curva que define el comportamiento filtrante para suelos compactos en la fig. 5.9, mientras que los resultados obtenidos para los tejidos y los no-tejidos termosoldados concuerdan con la curva que define el comportamiento filtrante para suelos en estado suelto en la misma figura.

Una posible explicación es que las partículas de un suelo que está en contacto con un geotextil de textura lisa (tal como uno tejido o uno no-tejido termosoldado) tienen mayor posibilidad de moverse y de pasar a través de él; mientras que aquellas partículas en contacto con un geotextil de textura rugosa (como la de los geotextiles no-tejidos agujados) se mantienen en una misma posición y conservan su estado de confinamiento.

De aquí se desprende que para el diseño conviene hacer uso de la curva superior de la fig. 5.9 siempre que se consideren suelos compactos protegidos por geotextiles no-tejidos agujados. Asimismo, se recomienda utilizar la curva inferior cuando el suelo por proteger se encuentre en estado suelto, independientemente del geotextil que piense usarse, o bien cuando se empleen geotextiles de textura lisa aunque el suelo presente una gran compactad.

La limitación más importante de este criterio consiste en que no garantiza la estabilidad del suelo protegido cuando su estructura se ve afectada en forma constante por un flujo turbulento o un cambio periódico nte de velocidad y dirección (limitación que también presenta el criterio de retención para filtros granulares). Esto se aprecia al observar los curvas obtenidas por Schuber y Brandl cuando consideraron en sus experimentos un flujo turbulento u alternao. Bajo tal condición el valor recomendable del tamaño equivalente d_{15} porosa se reduce notablemente.

No obstante, el criterio expuesto resulta tener mayor validez que el derivado de las reglas clásicas para filtros granulares - puesto que éste considera la influencia de los dos parámetros más importantes que determinan la estabilidad del suelo protegido, como son: el coeficiente de uniformidad y la capacidad relativa.

Con objeto de hacer más objetiva la comparación puede representarse a ambos criterios en una gráfica como la de la fig. 5.9. Para ello es necesario establecer primero una relación entre los diámetros d_{50} y d_{85} del suelo por proteger, que son los parámetros manejados en uno y otro.

$$\text{Si, } d_{100} = d_{50} Cu$$

$$d_{85} = d_{50} Cu^{0.7}$$

$$\text{Y } d_{50} = \frac{d_{85}}{Cu^{0.7}}$$

Desplazando esta última expresión puede hacerse de nuevo la gráfica de la fig. 5.9, pero tomando ahora como ordenadas los valores que toma la relación $\frac{d_{85}}{d_{50}}$. En el caso del criterio derivado de las reglas clásicas para filtros granulares esta relación tiene un valor constante, pero en el del criterio desarrollado especialmente para filtros de geotextiles su valor depende del coeficiente de uniformidad y de la capacidad relativa del suelo por proteger, razón por la cual hay diferencias muy importantes en los resultados que se obtienen con cada uno (fig. 5.11).

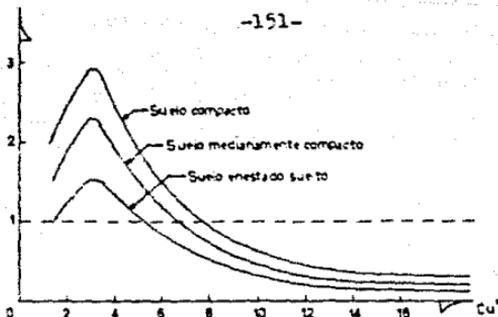


FIG. 5.3 REPRESENTACION GRÁFICA DE LOS EOS CRITERIOS QUE EXISTEN PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE LOS GEOTEXILES (Ref 31)

De acuerdo con la gráfica, la aplicación del criterio derivado de las reglas para filtros granulados (representado por la línea horizontal discontinua) puede conducir a dos situaciones erróneas:

- 1^a) Cuando el coeficiente de uniformidad es pequeño, los valores que este criterio simplista recomienda para el diámetro equivalente de poros son muy pequeños, lo cual aumenta el riesgo de una obstrucción.
- 2^a) Cuando el coeficiente de uniformidad es grande, el criterio - recomienda valores demasiado grandes para el tamaño equivalente de poros, situación que aumenta la probabilidad de que ocurra la tubificación.

Estas situaciones hacen evidente la conveniencia de usar el criterio desarrollado especialmente para los geotextiles.

5.5. Resultados de pruebas efectuadas con modelos

Aparentemente, la mejor manera de evaluar el comportamiento de los filtros de geotextiles ante un flujo turbulento y alternado es por medio de experimentos que reproduzcan esta condición y evalúen el efecto que tiene sobre una obra ya terminada.

Lo anterior puede lograrse construyendo modelos de las obras proyectadas y sometiénolos a las fuerzas de la naturaleza que tienen que soportar.

Los primeros experimentos con modelos que se realizaron en los Estados Unidos para evaluar el comportamiento de los filtros de geotextiles en las obras de control de erosión, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de Florida, en 1959. Los objetivos de tales experimentos fueron, por un lado, observar el comportamiento de varios tipos de revestimientos, rompeolas y espigones al incorporar en ellos filtros de geotextiles y exponerlos a un oleaje severo; y por otro, evaluar la magnitud de la erosión en el suelo protegido.

Por lo que respecta al primer objetivo, se consideró en todos los casos que la obra real se iba a construir sobre un suelo arenoso, y que el tamaño promedio de las partículas (d_{50}) era de 0.2 mm. La dirección del oleaje fué perpendicular en todas las obras probadas. Este oleaje se generó en forma artificial dentro de un tanque de prueba con dimensiones de 1.8 m de ancho y 1.2 m de profundidad, donde también se construyeron los diferentes modelos. Se arregló que éstos tuvieran frente a ellos un fondo artificial con objeto de evitar que al principio de la prueba se acumulara arena sobre las estructuras. Los resultados en este caso fueron que, como se esperaba, en las estructuras que se colocaron los filtros no se registraron daños importantes, mientras que en aquellas donde no se pusieron, el arena comenzó a perderse desde un principio creándose huecos en la estructura del suelo protegido que a su vez generaron asentamientos en los modelos, los cuales en algunos casos produjeron el colapso.

En la fig. 5.12 se muestran dos revestimientos rígidos, formados a base de bloques de concreto interconectados, después de haber sido expuestos a la acción de las olas. El revestimiento de la izquierda no cuenta con un filtro de protección. Por su parte, el de la derecha tiene una sola filigrana bajo los bloques de concreto. Por lo demás, otros revestimientos se probaron de los mismo -- (puede apreciarse que los bloques de concreto se separaron debido a la pérdida de salud causada por las explosiones de las ondas de choque).

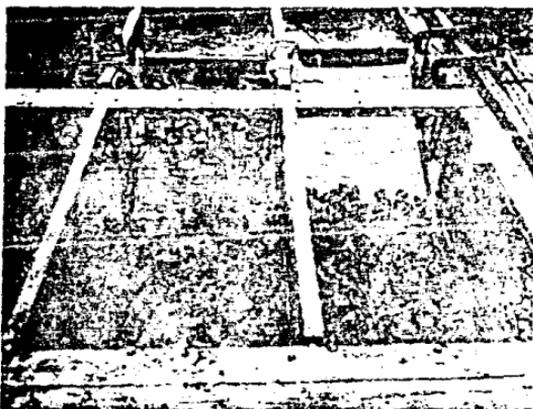


Fig. 5.12. REVESTIMIENTOS RÍGIDOS DE CONCRETO INTERCONECTADOS. (A) SIN FILTRO DE PROTECCIÓN. (B) CON FILTRO DE PROTECCIÓN.

El revestimiento de la izquierda no cuenta con el filtro que se destruyó, mientras que el que a la derecha sí cuenta con el mismo.

Además de los experimentos mencionados se realizaron otros para determinar qué tanto crecía permitiendo los filtros de geotextiles. El procedimiento en sí mismo consistió en exponer al oleaje una caja llena de arena, abierta en su parte superior, pero protegida por un geotextil. Dicha caja se colocó sobre un talud cuya inclinación guardaba una relación 3:1 (3 en distancia horizontal por 1 en distancia vertical), el cual se formó dentro de la arena de tal que se sumergiera el oleaje.

La arena se distribuyó en los tres compartimentos que tenía la caja de 22.5 pulg. (57.3 cm) de largo, 6.5 pulg. (16.5 cm) de ancho y 1 pulg. (2.54 cm) de espesor. En el de hasta arriba se puso arena con $d_{50} = 0.08$ mm, en el intermedio arena con $d_{50} = 0.32$ mm y en el de hasta abajo se puso arena con $d_{50} = 0.4$ mm.

La velocidad de las olas generadas fue de 1.5 m/seg, valor - que corresponde a las condiciones que están presentes en una obra real cuando la acción del olaje es moderada.

Después de soportar el embate de las olas por dos horas, la caja no mostró una pérdida visible de arena así que el experimento se detuvo. Posteriormente se sacaron las muestras y se pesaron. - Se confirmó entonces que no había ocurrido una pérdida significativa de material granular.

El tipo de tela que se evaluó en los experimentos mencionados corresponde al grupo de los geotextiles tejidos ya que fueron éstos los primeros que se desarrollaron.

Las principales conclusiones que se derivaron de esta experiencia fueron las siguientes:

La capacidad de retención de los geotextiles tejidos en general resulta suficiente para evitar la migración de partículas de hasta 0.08 mm de diámetro.

La permeabilidad de estas telas puede mantenerse relativamente constante con el paso del tiempo (la base de esta afirmación fue que después de realizar observaciones durante un año en una obra terminada no se observaron cambios significativos).

La resistencia que en general presentan cuando se dejan caer - piedras u otros objetos pesados sobre ellas es buena.

Si en la época que se realizaron estos experimentos se reconoció el potencial que podían tener los geotextiles para ser usados como filtros en obras de control de erosión, con mayor razón resulta factible en la actualidad suponer que éstos pueden tener un buen funcionamiento, aún bajo condiciones de flujo turbulento y reversible, debido al enorme desarrollo que se ha tenido desde entonces.

5.6 Experiencias obtenidas en obras realizadas

Es realmente difícil poder llevar un control del comportamiento que siguen estos filtros por periodos de tiempo muy largos y - por ello existe poca evidencia que permita ajustar o calibrar los métodos de diseño descritos en este capítulo.

No obstante, los investigadores Kealey, Long y Calhoun, en un intento por realizar una evaluación del funcionamiento de los geotextiles en el campo, por lo menos en forma cualitativa, se dedicaron a observar toda una variedad de obras en las que se habían empleado como filtros, incluyéndose las obras de control de erosión.

Aunque no se obtuvo una gran información en esta evaluación como para confirmar o rebatir los criterios de diseño existentes -- tampoco se pudieron atribuir fallas importantes a las obras en las que se han usado, excepto algunas obstrucciones en zonas aisladas y desgarros ocasionales. En el capítulo seis se exponen algunos de los ejemplos más notables que existen de obras de control de erosión en las que se han usado filtros de geotextiles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Agershou W.A., Synthetic Filters in Coastal Protection, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division (ASCE), Vol. 97, No. WW1, U.S.A. 1961.
2. Giroud J.P., Designing with Geotextiles, Matériaux et Constructions, Vol. 14, No. 82, France 1982.
3. Giroud J.P., Filter Criteria for Geotextiles, Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Vol 1, U.S.A. - 1982.
4. Hoare D.J., Synthetic Fabrics as Soil Filters: A review, Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE), Vol. 108, No.10, U.S.A. 1982.
5. Koerner R.M., Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, U.S.A. 1986.
6. Lawson G.P., Filter Criteria for Geotextiles: Relevance and Use, Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE), Vol 108, No. 10, U.S.A. 1982.
7. Ramirez A.M., Los Geosintéticos y el Ingeniero de Diseño, Memorias del Simposio sobre Geosintéticos, S.M.M.S., México 1990.
8. Sanchez G., Comportamiento filtrante de Filtros Geotextiles con el tiempo, Memorias del Simposio sobre Geosintéticos, S.M.M.S., México 1990.
9. SUPAC, Phillips Fibers Engineered Geotextiles, Phillips Fibers - Corporation, U.S.A. 1987.

6. EXPERIENCIAS DE LA UTILIZACIÓN DE GEOTEXTILES EN OBRAS DE PROTECCIÓN

Con objeto de poder evaluar mejor la alternativa que representa el uso de geotextiles en obras de control de erosión se describen a continuación algunos de los casos en que han sido utilizados.

6.1 Reconstrucción de un muro de enrocamiento en la costa oeste de los Estados Unidos

Una de las primeras aplicaciones que tuvieron los filtros de geotextiles en obras de control de erosión fue cuando se utilizaron en 1961 en la reconstrucción de un muro de enrocamiento que protegía a una planta de tratamiento de aguas negras en la costa oeste de los Estados Unidos. El muro había sido arrasado por las olas generadas durante una fuerte tormenta y era necesario hacer un nuevo proyecto. Se decidió entonces reconstruir el muro, pero utilizando esta vez de una corona formada por piedras más grandes y pesadas. Como había una gran diferencia entre el tamaño de estas piedras y el tamaño de las partículas del suelo protegido, el filtro graduado de material granular que se requería debía estar formado por muchas capas para lograr una transición adecuada. El espesor total del mismo era de 1.80 m. Esto significaba extenderse mucho sobre el mar, lo cual dificultaba la colocación de las diferentes capas. La solución a tal problema consistió en utilizar un filtro tan ligero como una tela, es decir, un geotextil (fig. 6.1). En esa época solo existían los geotextiles tejidos, así que se utilizó uno de éstos. Aunque sí se colocó una capa de grava entre el geotextil y la corona fue cada tres metros a lo largo de los muros para evitar que durante la colocación de las piedras. La última vez que se tuvo conocimiento del estado de esta obra fue en 1977, y no se reportó entonces ninguna anomalía que pudiera deberse a un mal comportamiento del geotextil.

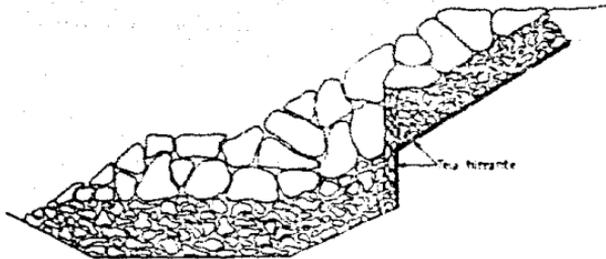


FIG. 61 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MURO DE ENROCAMIENTO DESPUES DE LA RECONSTRUCCION

6.2 Formación de un tipo especial de espigón en Ontario, Canadá

Otra aplicación tuvo lugar en el poblado de Saint Marie, de Ontario, Canadá. El Departamento de Obras Públicas llevó a cabo la construcción de un espigón en forma de 'L' en el Rio Saint Marie para que funcionara como una pequeña marina. La longitud propuesta fue de 193 m en forma perpendicular a la margen derecha y de 107 m en la misma dirección de la corriente. Usualmente, el núcleo de estas estructuras se forma con el material de rezaga que resulta de la explotación realizada para obtener los elementos de la coraza, pero como en este caso el banco de préstamo más cercano se encontraba a una distancia de 240 km el costo de transportación del material rétro era altísimo, así es que se decidió usar elementos de concreto para la coraza y material de relleno para el núcleo. Estos materiales trísticamente no costaron nada puesto que se obtuvieron del mismo pueblo de Saint Marie. Para formar la coraza se utilizaron bloques de concreto que provinieron de varias demoliciones y para formar el núcleo se empleó material de excavaciones cercanas. Terminada la construcción del núcleo se hizo evidente la necesidad de protegerlo contra la acción del oleaje antes de colocar la coraza. Se consideró entonces el uso de una protección a base de un filtro granular, sin embargo, experiencias pasadas

das en obras fluviales cercanas indicaban que la máxima vida útil que podía esperarse con dicho sistema era de 10 años, y se deseaba que ésta fuera de 25 años o más. Finalmente, se decidió usar un geotextil, con el que se cubrió todo el cuerpo del espigón, no sin antes corregir las irregularidades de su superficie (fig. 6.2). Al colocar los elementos de la coraza se tuvo mucho cuidado para no rasgar la tela.

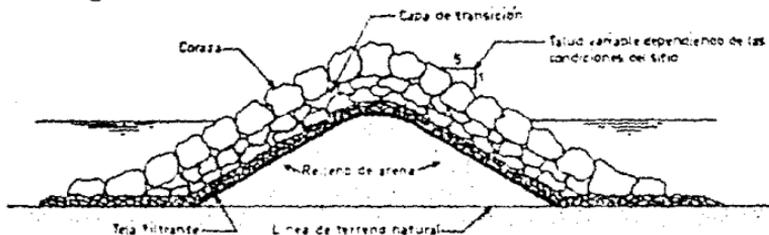


FIG. 6.2 ESPIGÓN FORMADO MEDIANTE UN RELLENO DE BOLA CAUDAL USANDO UN GEOTEXTIL PARA PROTEGERLO DE LA EROSIÓN (R.M. 11)

6.3 Control de la erosión en los afluentes del Río Mississippi, EUA

Otro ejemplo es el de las corrientes que constituyen un sistema de drenaje natural en las zonas aledañas al famoso Río Mississippi de los Estados Unidos. Durante los años sesentas, el Cuerpo de Ingenieros Civiles del Ejército realizó muchos trabajos para la ampliación y profundización de estos canales naturales, con objeto de aumentar su capacidad de transporte y poder evacuar en forma más rápida el agua proveniente de lluvias torrenciales para evitar la erosión de tierras de cultivo adyacentes al río. Con la ampliación de los canales surgió luego la necesidad de construir puentes más grandes y más largos, en los que constantemente se tenían problemas de estabilidad por la forma en que se acentuaba la erosión de las márgenes en zonas cercanas. Cuando ésta era lo suficientemente severa producía el colapso de las estructuras.

Dichos problemas hicieron que se convirtiera en una práctica común el proteger con un pedraplén las márgenes de los canales -- desde 9 m aguas arriba hasta 15 m aguas abajo de los puentes, incluyendo los taludes que forman los estribos. Bajo el pedraplén debe colocarse un filtro para que el agua no arrastre a las partículas del suelo protegido y provoque un asentamiento que conduzca a la falla del puente. El filtro con el que tradicionalmente se había dado solución al problema hasta 1977 consistía en una capa de 20 a 30 cm de grava con una graduación específica, la cual se colocaba entre el suelo protegido y el pedraplén. Aunque actualmente existe disponibilidad para obtener este material en el Distrito de Memphis, se ha preferido utilizar geotextiles en muchos de los puentes que se han construido desde entonces. Las principales razones que han motivado esta nueva práctica son que se tiene un menor costo y una mayor facilidad de colocación, siendo mínima la movilización de equipo, a diferencia de los filtros granulares en los que para su formación se requiere de camiones de volteo y traxcavos.

De 35 proyectos de protección de márgenes que se han llevado a cabo en la zona con filtros de geotextiles, solo en 4 se han presentado problemas relacionados con la obstrucción de los poros de las telas, en porciones correspondientes al 10 % del área total que protegen. En todos los casos el daño fue reparado cortando primero la parte afectada del geotextil para disipar la presión de poro que se había concentrado, y colocando luego un filtro de material granular protegido junto con la tela por un enrocamiento.

Las cuatro fallas tuvieron en común dos cosas: se desarrollaron después de un descenso repentino del nivel del agua en el río y ocurrieron en sitios donde las márgenes estaban formadas por partículas de suelo muy finas, como las de una arena limosa.

El cambio brusco en el nivel de agua del río provocó un flujo de agua muy rápido del suelo que formaba las márgenes hacia el cauce. Lo que debe haber pasado en los casos mencionados es que los geotextiles no tenían la permeabilidad suficiente para permitir el paso de toda el agua que fluía de las márgenes; así que dichas fallas pudieron haberse evitado evaluando con más cuidado las propiedades requeridas de los geotextiles utilizados.



FIG. 8.3 SECCIÓN DE CÁMERA DE UNA PROTECCIÓN DE MÁRGENA PARA COMPARAR EL COMPORTAMIENTO DE FILTROS DE GEOTEXTIL EN LA PARTE FRONTAL CON EL DE FILTROS GRANULARES EN LA PARTE POSTERIOR (RIVER).

6.4 Protección de márgenes en canales artificiales para la navegación, R.R.A.

Probablemente una de las pruebas más rigurosas para los filtros de geotextiles consiste en utilizarlos para proteger taludes de canales artificiales por donde circulan grandes embarcaciones. Esto se debe a que en dicha aplicación las telas se ven sujetas a tres efectos nocivos simultáneos, generados por lo brusco de las secciones transversales: En primer lugar, el agua existente entre la embarcación y las márgenes es desplazada hacia atrás, adquiriendo una velocidad de hasta 2 m/seg; en segundo lugar, el nivel del agua sube y baja a cada momento; y, por último, el constante roce de las embarcaciones provoca la corrosión de ellas de altura considerable.

En el pasado, muchos países europeos utilizaban filtros granulares cubiertos por enrocamientos para proteger los taludes de sus canales artificiales, sin embargo era muy corta la vida útil de dichas obras. El constante movimiento del agua causaba el desplazamiento de los elementos del enrocamiento y del filtro, situación que se veía agravada con la generación de olas. Una vez que el filtro granular era destruido, el suelo de arroyo se erosionaba hasta que se producía un deslizamiento de terreno. En búsqueda de una solución la empresa alemana NAVE desarrolló una tela filtrante en los años sesenta.

Ahora, por más de dos décadas, los filtros de geotextiles han ido reemplazando a los filtros granulares en muchos canales europeos. Por ejemplo, en el canal Mitelland, de más de 30000 Km de longitud total, que es una de las principales arterias para la navegación del valle Ruhr, en Alemania Occidental, en el que se han utilizado varios miles de metros cuadrados. A más de 10 años de su instalación su comportamiento sigue siendo satisfactorio.



FIG. 6. LA GEOTEXIL DE NAVE ES UNA PRACTICA COMUN EN UNIR LAS FILTRANTES EN COMBINACION CON GAVIONES PARA LA PROTECCION DE TALUDES DE CANALES (R.M. 11)

6.5 Lucha contra la erosión para proteger el antiguo Faro del Cabo Hatteras, E.U.A.

Debido al proceso natural de erosión de playas, las islas que forman una barrera a lo largo de la costa suroeste de los Estados Unidos están empujando hacia el poniente. La isla Hatteras (punto central de los famosos bancos de arena de la costa de Carolina), como las demás islas que forman dicha barrera, es extremadamente inestable a causa del transporte litoral. Por miles de años las corrientes marinas han erosionado las playas de esta isla, arrastrando la arena hacia la línea costera del estrecho de Pamlico. Estas condiciones han hecho que las construcciones establecidas cerca del mar se encuentren seriamente amenazadas. Tal es el caso del antiguo Faro del Cabo Hatteras, la construcción se necesitaría más alta de su altura en 1970.



FIG. 6.5 CONSTRUIDO EN 1870 EL FARO DEL CABO HATTERAS ESTA ACTUALMENTE AMENAZADO POR EL AVANCE DE LA EROSIÓN EN LA COSTA OESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS (R.R. 31)

A través del tiempo, se han realizado varios proyectos para proteger a dicha estructura. En los años treinta se instalaron 270 m de tablancas de barro a todo lo largo de la costa oeste de la Isla Matanzas, sin embargo en vez de detenerse al proceso de erosión se intensificó, y para 1935 la situación fue tan seria que la Guardia Costera tuvo que abandonar la estructura y construir una torre de acero, una milla hacia el oeste del faro para sustituirlo en su función. Posteriormente, en 1950 la erosión pareció estabilizarse y se reactivó el faro; sin embargo hacia los años sesentas el problema empezó a resurgir y fue necesario bombear 240,000 m³ de arena del estrecho de Famlico para la regeneración de la playa, además de que se construyeron tres grandes arcos de concreto reforzado para complementar la protección de las tablancas. En 1973 se llevó a cabo un proyecto más grande de restauración de la playa, que consistió en remover casi un millón de metros cúbicos de arena. En marzo de 1980 un fuerte viento proveniente del norte afectó tanto a la playa que se iniciaron otras medidas de emergencia, colocándose a los siete meses una tela filtrante para cubrir la zona más erosionada cercana al faro. Además se construyeron más arcos de concreto, los cuales se extendieron 45 m tierra adentro; no obstante, el mar erosionó nuevamente la zona en diciembre del mismo año, y forzó a que se pensara en un segundo proyecto de emergencia, cuando el agua llegó a estar a 15 m del faro. Estos y los proyectos subsecuentes han costado al Gobierno de Estados Unidos más de \$ 229,000 (U.S. Dollars).

En agosto de 1982 se pensó que los geotextiles podrían ayudar a resolver el problema y al solicitar asesoría a una de las compañías que fabrican estos materiales se recomendó el uso de un geotextil tejido, hecho a base de monofilamentos de polipropileno para utilizarlo como filtro.

En ese entonces, dicha tela ya tenía un récord exitoso para el Cuerpo de Ingenieros Civiles y diversas compañías constructoras, en obras como diques, muros de anclamiento y otros proyectos de control de erosión. Adicionalmente, se recomendó usar otra tela similar, pero tratada para soportar la exposición a los rayos solares, para formar 110 bolsas de plástico de 1.5 X 2.1 m que se transportaron al sitio de la obra y se llenaron de arena. Estas bolsas se colocaron sobre la otra tela con la que se cubrió la parte erosionada de la playa, formándose un muro para disipar la fuerza de las olas. Se requirió de una grua para mover las bolsas llenas de arena y colocarlas a 13 m del faro, donde la erosión era más crítica. Estos trabajos se terminaron en un mes.

Hasta ahora la obra de protección ha tenido éxito. Un mes después de que se terminaron los trabajos otra tormenta azotó a la isla, sin embargo, fué mínima la erosión que se produjo cerca del faro.

6.6 Conservación de playas que constituyen un atractivo turístico en E.U.A.

Las propiedades que se encuentran cerca del mar son muy valiosas en los Estados Unidos, especialmente las de las playas de Florida, por el clima tan agradable que existe en dicha zona, el cual atrae a muchos visitantes. Sin embargo, esas propiedades están expuestas a las fuerzas devastadoras de la naturaleza como lo son las corrientes marinas y el constante embate de las olas, cuya acción destructiva se incrementa notablemente durante las tormentas tropicales. Con el desarrollo turístico que ha tenido lugar en casi todo terreno disponible a lo largo de la costa del Atlántico en Florida, lo último que cualquier inversionista quiere es que -

se reduzca el tamaño de su propiedad con el paso del tiempo; no obstante que es lo que precisamente está sucediendo.

Recientemente muchos propietarios de esta vulnerable tierra han hecho uso de los geotextiles para conservarla.

La Sra. Fox, que vive en Cocoa Beach y que posee una parte de este terreno hizo construir en 1980 una protección marginal frente a su casa, de aproximadamente 20 m de longitud, cuyo elemento clave fue un geotextil no-tejido agujado, que se colocó directamente sobre el terreno natural para evitar la pérdida de material. El revestimiento completo estuvo formado por el geotextil, una capa de 30 cm de arena y el enrocamiento. La protección se asemeja a una duna natural y es capaz de permitir desarrollo de vegetación sobre ella (fig. 6.6.b).

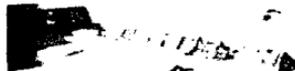


FIG. 6.6. COMPARACION ENTRE UNA PROPIEDAD SIN PROTECCION MARGINAL Y OTRA QUE SI CUENTA CON ELLA (VER FIG. 4.1)

Para esta tarea específica se escogió una tela de 19.0 gr/cm² (8 oz/yd²), hecha de polipropileno, de las que presenta estabilidad ante la exposición a los rayos solares. Se usaron rollos de 45.7 m (150 pies) de largo y 4.6 m (15 pies) de ancho para cubrir un área de 557.6 m² (6000 pies²).

La tela fue colocada por dos trabajadores únicamente, requiriéndose trasladarla en los extremos. Antes de desenrollarla se afinó el terreno natural hasta formar un talud con inclinación de 15° (relación 3:1). La tela se colocó sobre el material compactado a mano, y sobre ella se puso una capa de arena para protegerla de los impactos generados por la colocación de las piedras del enrocamiento, cuyo peso máximo fue de 90 Kg (200 lbs).

Con este sistema de protección el agua es capaz de pasar a través de las piedras del enrocamiento, filtrarse por la arena y luego pasar al geotextil, pero sin arrastrar las partículas de arena de la playa.

La prueba más severa que ha pasado este revestimiento fué el huracán ocurrido en 1984 que afectó al sureste de los Estados Unidos. Dicha tormenta erosionó fuertemente un gran número de propiedades pero causó poco daño en el terreno protegido con el geotextil.

Otro caso del que se tiene registro es el del malecón localizado en la playa Norte de Myrtle de la Bahía Cherry Grove, en Carolina del Sur, en cuya construcción se consideró la instalación de un geotextil como filtro (Fig. 6.7).

Debido a que para proteger el embudo de las olas y proteger a los edificios en el condominio del Fraccionamiento Villa del Mar, este malecón ha resistido ya la acción de dos huracanes en los que se

generaron olas de hasta 10 m de altura. Las olas se
bregaron al nivel máximo del agua en el l m, sin causar un
gran daño.



FIG. 67. MALECON BAHIA DE LA PAZ CON TELA ALTRANTE, TAL
COMO SE OBSERVA DESPUES DEL PASO DE UN TORACAN
EN SAN CAROLINA DEL SUR, EN 1961.

La construcción de la malecon con el sistema de
proceso que se describe en el presente:

En la parte de la obra se construyeron los muros con una profun-
didad de entre 0,75 y 0,90 m (2 1/2 a 3 pies) a toda la larga de
la parte baja de la zona por construir, y con el material de la
zona construida en talud con una inclinación aproximada de 60°.
Debido a que las olas tenían una altura entre 10 y 12 m, se necesi-
taron de 1,5 m (5 pies) de muros que fácilmente se inundaron por las
olas. La tela se extendió en sentido perpendicular a la
costa, de manera de cubrir toda el talud y pasar por el interior
de la zanja, dejando una línea horizontal, que se usó para
trabaja de rellenar nuevamente la zanja, pero no con el mate-
rial excavado sino con piedras, las cuales también se depositaron

sobre la tela, dejando solamente una parte libre para traslaparla con otra sección. Los traslapes fueron cosidos con hilo polvester - algodón. Se colocaron piedras sobre el talud hasta que alcanzó una altura de 3m respecto al nivel más bajo de la playa. La barrera se completó con un pequeño muro de concreto de 60 cm de alto - que se construyó en la parte superior del talud. Con la marea alta el nivel del agua llega apenas a la mitad del muro.

Desde su construcción en 1977, este olecón ha requerido un mantenimiento mínimo, aun después de que se presentó el huracán David, cuando simplemente tuvieron que reacomodarse algunas piedras.

6.7 Aplicaciones recientes en presas de tierra y enrocamiento

La construcción de presas ofrece grandes expectativas para el uso de geotextiles como estratos filtrantes o capas separadoras, en lugar de, o en combinación con materiales granulares.

A continuación se describen los campos de aplicación que se han abierto a los geotextiles y las funciones que tienen en cada caso, según el Consejo Británico de Grandes Presas.

Campo de Aplicación

Funciones del geotextil

a) Protección de taludes, aguas abajo.

Control de erosión en caso de precipitación.

b) Drenaje superficial aguas abajo.

Derogaje de aguas de filtración.

c) Protección de taludes, aguas arriba.

Control de la erosión por voltes de olas y vaciado de la presa.

Campo de Aplicación

- d) Estratos drenantes horizontales.
- e) Capa separadora y filtrante en respaldo de aguas arriba.
- f) Capa separadora y filtrante para dren tipo chimenea y drenaje de la base de aguas abajo.
- g) Estrato drenante en respaldo de aguas abajo para sustituir dren tipo chimenea.

Funciones del geotextil

- Disipación de presiones de poro.
- Control de erosión y separación de superficies limítrofes interiores.
- Protección contra la erosión interna debida a aguas de lluvia y de infiltración en superficies limítrofes interiores.
- Evacuación de agua infiltrada; protección contra erosión interna.

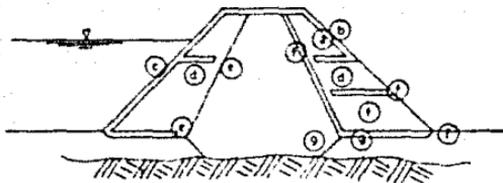


FIG. 8. APLICACIONES DE GEOTEXTILES EN PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO (VOL. 2).

Hasta el momento se ha tenido éxito con el uso de geotextiles en las siguientes presas:

- Austria : Gepatsch
- Alemania: Kinzing, Förmitz, Praxenau.
- Francia : La Flamet, Valcros, Arc d'isere, La Valiere, Rille, L'ospedale, Puyterrier, Codolle, Verney.
- Italia : Edolo, Simbirizzi, Castreccioni.
- Inglaterra: Copeland, Upper S. Woodburn, Glenhordial, Frankley, Millbrook.
- Noruega : Fridolsvatn
- E.U.A. : Indiantown, Columbia Lake, Blue Ridge Mountain, La von Lake.
- Canadá : Highland Valley, Conia-Piscaa, James Bay.
- Australia : Kyuna Bay, Tellawarra, Hazelwood, Ben Boyd, Loy - Yang.
- Hong Kong : High Island
- Malasia : Bukit Merah
- Tailandia : Pitsanulok
- Sudáfrica : Kilburn, Hans Strijdom.

Por otro lado, investigadores alemanes que han observado la aplicación de los geotextiles en 100 diferentes presas establecen que los principales usos que se les han dado son los siguientes:

<u>Forma de uso</u>	porcentaje (%)
- Estabilización del talud de aguas abajo.	4.6
- Estratos drenantes en respaldo de aguas abajo.	4.0
- Estabilización de talud de aguas arriba.	5.7
- Drenes internos provisionales	2.4
- Filtro interno en respaldo de aguas arriba para transición entre capa impermeable y suelo de cimentación.	13.2
- Filtro interno en respaldo de aguas abajo.	10.7
- Revestimiento de drenes.	4.1
- Otros.	4.0

El análisis de estas estadísticas muestra que donde más se usan es en las áreas externas, como son los respaldos, lo cual probablemente obedece a razones de seguridad ya que en dichas zonas es más fácil hacer reparaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Dallaire G., Filter Fabrics can cut costs of River Bank and -
Shore Protection Structures, Civil Engineering (ASCE), Vol.47,
No. 3, U.S.A. 1977.
2. POLYFILT, Prácticas de Diseño, Polymfelt, U.S.A. 1987.
3. SUPAC, Beach Erosion continues to threaten 113 year old Cape -
Matteras Lighthouse, Construction, U.S.A. 1981.
4. SUPAC, Phillips Suroc Fabric saving Beachfront Property, Non-
wovens Industry, U.S.A. 1981.
5. SUPAC, Nonwovens Fabric help Seawall withstand Ocean Founding,
Suroc Geotextiles, Phillips Fibers Corporation, U.S.A. 1982.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con frecuencia, el ingeniero civil tiene que afrontar las consecuencias que tiene la socavación sobre las estructuras adyacentes a los márgenes de los ríos y a las costas, o bien sobre el propio suelo que forma parte de ellas. En el primer caso, la afectación consiste en la desestabilización de las estructuras por pérdida del material de apoyo y/o confinamiento, en forma progresiva o repentina; mientras que en el segundo, el daño lo constituye la pérdida en sí de terrenos aprovechables, para la agricultura - en el caso de riberas fluviales, o para el turismo en el caso de costas.

Existen además los problemas derivados del transporte y depósito de materiales erosionados, que consisten principalmente en el azolve de presas y en la obstrucción de canales de navegación.

La mejor manera de combatir tales problemas consiste en evitar el desarrollo de la erosión mediante la construcción de obras de protección en los sitios más vulnerables.

La elección del tipo adecuado de protección depende, en primer lugar, de que tan severa y continua sea la acción erosiva del agua, y en segundo lugar, de la importancia que tenga el fenómeno en cuanto a daños materiales y humanos.

En los ríos, cuando se requiere proteger márgenes que están en contacto con corrientes pequeñas se pueden adoptar métodos tan sencillos y baratos como son imprimirles cierta inclinación y plantar sobre ellas algún tipo de vegetación adaptable; si en cambio se trata de ríos muy grandes, cuyos márgenes estén sujetas a una gran erosión, es necesario construir muros, diques longitudinales o espigones.

Por lo que se refiere a las obras de protección costera, son -

casi siempre de gran magnitud puesto que deben soportar la acción del oleaje. En este caso, la forma de protección más simple consiste en enhuacalados formados con pilotes de madera, los cuales pueden usarse cuando la afectación no es muy grande, aunque si se quiere una protección que sea más duradera se recomienda hacer uso de tablestacas, revestimientos o muros. Ahora que, cuando el oleaje es muy severo el tipo de protecciones que tienen mayor éxito - son las estructuras masivas como los diques, o las formadas por elementos sueltos como son: espigones, rompeolas o escolleras.

Aunque son varios los aspectos de mecánica de suelos que hay que definir para el proyecto de dichas obras, uno de los más importantes es el diseño de los filtros requeridos para evitar tanto la pérdida de partículas finas como la generación de presiones hidrostáticas nocivas.

Los filtros que tradicionalmente se han usado en ellas son los que se componen de capas sucesivas de materiales granulares como: limos, arenas y gravas, denominados comúnmente filtros de material graduado. Como nueva alternativa, en países desarrollados se ha generalizado también el uso de telas filtrantes de materiales sintéticos, prácticas que también se ha ido difundiendo en nuestro país.

Si bien el uso de filtros granulares resulta casi siempre satisfactorio, se han dado casos de obras que han fallado por errores cometidos durante su construcción debido a la complejidad del proceso. Por otro lado, el costo de los mismos puede elevarse mucho si no hay cerca de la obra un banco con los materiales adecuados y en la cantidad suficiente. Razones como éstas han conducido a los ingenieros al uso de materiales sintéticos como los Geotextiles que son telas plásticas, permeables y flexibles.

A partir de la evolución de las características que presentan ambos tipos de filtros, los naturales y los sintéticos, se encuen-

traron las siguientes diferencias fundamentales:

- 1) El uso de filtros granulares en obras de control de erosión de tipo flexible implica, en la mayoría de los casos, la formación de varias capas de agregados para lograr una transición gradual en el tamaño de las partículas del suelo por proteger y el de los elementos de la propia protección, con la cual se reduce la fuerza de arrastre del agua que penetra al suelo y se evita la pérdida de partículas finas. Con los Geotextiles, se tiene un menor espesor del filtro ya que por su mayor capacidad de retención no es necesaria la transición gradual de tamaños.
- 2) El proceso de formación de un filtro granular de varias capas es laborioso y a veces muy complicado, como por ejemplo cuando tiene que trabajarse bajo el agua y existen corrientes que no permiten un buen acomodo del material sobre el suelo, lo que se traduce a veces en fallas de las obras por deficiencias no detectadas durante la construcción. En cambio, la colocación de los Geotextiles es rápida y relativamente simple, razón por la cual se tiene un mayor control de calidad. Ello significa que aunque pueda resultar difícil también colocar un Geotextil en un área sumergida por su peso tan bajo, a diferencia del filtro granular su capacidad filtrante no se verá afectada.
- 3) La estructura uniforme y continua de una tela filtrante puede absorber en forma efectiva la fuerza de arrastre que constantemente genera el oleaje sobre obras de protección costera. Por su parte, los filtros granulares son susceptibles a perder su homogeneidad cuando en ciertas zonas son arrastradas las partículas que los forman, iniciándose con ello una falla progresiva de la estructura en la que se instalan.

- 4) Para la protección de suelos muy finos, formados por limas o arcillas, se dificulta la utilización de filtros de Geotextiles, porque se requiere de telas con aberturas de poros muy pequeñas para poder garantizar la retención de partículas, asumiéndose el riesgo de que éstas se obstruyan por la acumulación de las mismas partículas, y que se generen subpresiones que afecten la estabilidad de la obra. Esto no sucede con los filtros granulares, ni aún con los de material cribado, ya que por muy cerrada que sea su estructura no dejan de permitir el flujo de agua, siendo incluso inevitable una cierta pérdida del material fino que forma parte del suelo protegido. Aceptando tener una pérdida de este material pueden emplearse Geotextiles con aberturas no tan pequeñas.
- 5) En cuanto al costo y la disponibilidad de los materiales para formar ambos tipos de filtros, es sabido que los filtros granulares son más económicos, siempre y cuando exista un banco de préstamo cercano del que pueden extraerse los agregados en la cantidad y con la calidad requeridas; de otra forma, puede economizarse la obra al tener que traer desde lejos dicho material o por tener que someterlo a diferentes tratamientos.
- 6) Es así que el costo de los filtros granulares está determinado fundamentalmente por los maniobras de transporte y de colocación, mientras que en los filtros de geotextiles depende más del precio que tienen los materiales, es decir los rollos de tela, puesto que la transportación y colocación representan un mínimo porcentaje de dicho costo (recordando en que se adquieren en alguna de las empresas ya mencionadas en nuestros casos y no tienen que transportarse).

- 7) Para poder evaluar en que casos resulta más conveniente el uso de Geotextiles que el de material granular, desde el punto de vista económico, debe estimarse en forma específica el costo total de ambas alternativas, habiéndose verificado previamente la factibilidad técnica de las dos.

De las observaciones anteriores se desprende que los Geotextiles constituyen una buena alternativa para usarse como filtros en obras de control de erosión.

Por lo que se refiere a las interrogantes que plantea su uso, es conveniente tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1) Las dos propiedades principales que determinan la eficiencia de los filtros de Geotextiles son, como en los filtros granulares, su permeabilidad y su capacidad de retención, para cuya evaluación existen métodos de ensayo de uso general. Los parámetros que se manejan en ellos para definir ambas propiedades son la permitividad, que no es más que la permeabilidad dada en función del espesor, y el tamaño equivalente de poros (EOS u O₉₅), el cual representa un valor promedio de las aberturas de las telas.
- 2) El mejor método a seguir para el diseño o la elección de filtros de Geotextiles es el que se basa en la comparación de los valores que tienen estas propiedades con los requeridos según las condiciones geotécnicas y geohidrológicas del sitio donde vayan a instalarse. Respecto a la forma de tomar en cuenta esas condiciones, se han desarrollado dos criterios principales: El derivado a partir de la adecuación de las reglas clásicas para filtros granulares, y el establecido con base en una teoría sobre filtración creada especialmente para los Geotextiles.

3) Según el primero de los criterios mencionados, los requisitos de permeabilidad y capacidad de retención quedan definidos por las siguientes expresiones:

3.1 En suelos friccionantes:

- A) Para la permeabilidad,
 $ECS > D_{15}$ del suelo protegido
- B) Para la retención de partículas,
 $ECS < D_{95}$ del suelo protegido y,
- $ECS \leq 2.3 D_{50}$ del suelo protegido (Si el suelo está bien graduado, y el tipo de geotextil instalado es no-tejido)
- $ECS \leq 1.4 D_{50}$ del suelo protegido (Si el suelo presenta una granulometría uniforme, y el tipo de geotextil instalado es tejido)

3.2 En suelos cohesivos:

- A) Para la permeabilidad,
 K del geotextil $> 100 K$ del suelo protegido
- B) Para la retención de partículas,
 $ECS < 0.08$ mm

4) Por su parte, el criterio desarrollado especialmente para los geotextiles considera lo siguiente:

4.1 En suelos friccionantes:

- A) Para la permeabilidad,
 K del geotextil $> \frac{K \text{ del suelo protegido}}{10}$

- B) Para la retención de partículas,

Edo. natural del suelo	Compacidad relativa (%)	Límite para el tamaño equivalente de poros	
		$1 < Cu \leq 3$	$Cu > 3$
Suelto	$Cr \leq 35$	$EOS < Cu D_{50}$	$EOS < \frac{9}{Cu} D_{50}$
Medianamente compacto	$35 \leq Cr \leq 65$	$EOS < 1.5 Cu D_{50}$	$EOS < \frac{13.5}{Cu} D_{50}$
Compacto	$Cr > 65$	$EOS < 2 Cu D_{50}$	$EOS < \frac{18}{Cu} D_{50}$

Nota: Es conveniente considerar la condición de suelo compacto siempre que éste sea el estado del suelo y se empleen geotextiles no-tejidos agujados; de otra forma, aunque el suelo sea compacto, si se usan geotextiles de textura lisa, habrá que considerar la condición de un suelo en estado suelto.

4.2 En suelos cohesivos:

No hay recomendaciones derivadas de esta teoría para tal tipo de suelos.

- 5) El análisis comparativo de ambos criterios indica que el desarrollado a partir de las reglas clásicas para filtros granulares puede tener mayor margen de error que el establecido especialmente para los geotextiles.
- 6) Ambos criterios tienen la limitación de que no garantizan la estabilidad de un suelo cuya estructura se ve afectada en forma constante por un flujo turbulento que cambia periódicamente de velocidad y dirección, por lo que para aplicarlos a las obras de control de erosión hay que manejar factores de seguridad muy altos.

- 7) Para las condiciones de un flujo turbulento y reversible, en las que resulta más importante la capacidad de retención que la permeabilidad de los filtros, por propia intuición, se considera más recomendable utilizar geotextiles no-tejidos - agujados, ya que éstos presentan una estructura tridimensional con la que se inhibe en forma más efectiva la migración de partículas.
- 8) Los criterios de diseño no resuelven totalmente el problema de la elección, sino que más bien proporcionan una orientación para saber hacia que grupo de telas debe dirigirse la experimentación, dando una pauta para proponer unas características requeridas iniciales, las cuales deberán ser evaluadas en el laboratorio reproduciendo las condiciones en las que se someterán las telas en las obras reales. Tal vez las propiedades determinadas con los criterios sean en algunos casos las requeridas realmente, pero habrá muchos otros en los que tengan que ajustarse en gran medida si las condiciones de servicio reproducidas en las pruebas con modelos así lo indican.
- 9) Las experiencias que se han tenido hasta la fecha en el uso de geotextiles como filtros en obras de control de erosión - indican en general un buen comportamiento. Aunque se han reportado pequeñas fallas, éstas se han debido a desgarros ocasionales de las telas o a que se pasó por alto que el suelo de apoyo estaba formado por partículas muy finas, las cuales llegaron a obstruir completamente los poros. En los ejemplos mencionados en el capítulo 6, aún a 14 años de su instalación, los geotextiles han demostrado tener una buena resistencia al intemperismo. La condición que más puede afectarlos es la ex-

posición directa a los rayos del sol, por lo que evitándola al máximo se alargará la vida útil de las obras.

- 10) En cuanto a las recomendaciones relativas al procedimiento de instalación de los geotextiles en las obras de control de ergsión, pueden consultarse en las referencias 2 y 4 del Capítulo 6.