

63



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"ASPECTOS FUNDAMENTALES SOBRE LOS
GEOSINTÉTICOS:
GEOTEXILES Y GEOMEMBRANAS"**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL
PRESENTA:
OLGA ROCÍO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
M.I. AGUSTÍN DEMENEGHI COLINA**



MÉXICO, D.F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.



VERDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/184/95

Señorita
OLGA ROCIO HERNANDEZ GONZALEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ASPECTOS FUNDAMENTALES SOBRE LOS GEOSINTETICOS: GEOTEXILES Y GEOMEMBRANAS"

- I. INTRODUCCION
- II. ANTECEDENTES
- III. ASPECTOS GENERALES DE LOS GEOSINTETICOS
- IV. GEOTEXILES
- V. GEOMEMBRANAS
- VI. USO Y APLICACIÓN DE LOS GEOSINTETICOS
- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

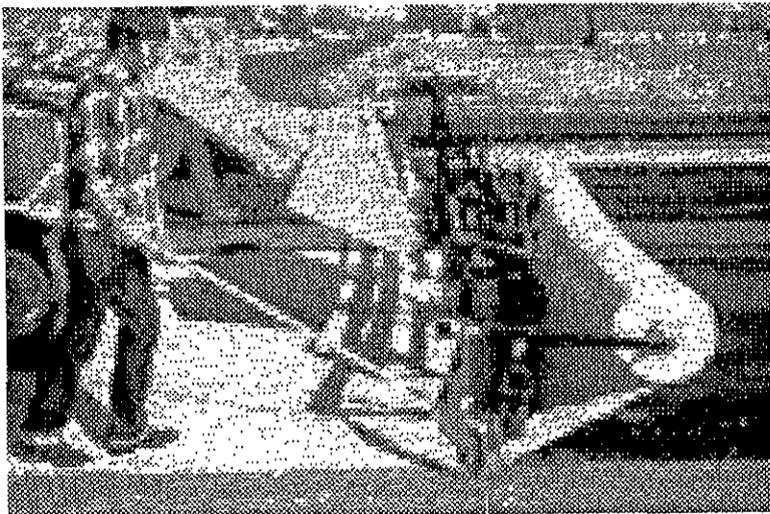
Cd. Universitaria a 22 de septiembre de 2000.

EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GEB/GMP/184/95

ASPECTOS FUNDAMENTALES SOBRE LOS GEOSINTÉTICOS: GEOTEXTEILES Y GEOMEMBRANAS



AGRADECIMIENTOS

Al ser amoroso que me dió la vida, excelente persona, ejemplo de trabajo y honestidad, quien ha sabido guiarme y me ha apoyado en todos los aspectos, sabiendo esperar el momento culminante de mis estudios y de este trabajo.

A la memoria de mi papá y mi tía Olga, quienes mientras vivieron me dieron todo su amor.

A mi querido esposo Memo, quien con su amor, comprensión y cooperación me ayudó a terminar mi tesis.

A mis hermanos Charito, Irma, Paty y Jorge quienes representan para mí motivo de esfuerzo y superación, gracias por confiar en mí.

A mi director de tesis, M.I. Agustín Demeneghi, quien me brindó todo su apoyo y sabiduría para que esta tesis saliera adelante, además de compartir conmigo su amistad.

Al Ing. Luis Candelas, Ing. Marcos Trejo, M.I. Gabriel Moreno y Lichita, quienes "me jalaron las orejas" cuando me hizo falta para concluir este trabajo; además de todos los apoyos y demostraciones de afecto hacia mi persona, lo que valoro enormemente.

A los profesores de la Facultad, por su esfuerzo loable y brindarnos a todos los alumnos su dedicación y conocimiento de la ingeniería en nuestro país.

A mis amigos y compañeros de trabajo, quienes estaban al pendiente de los avances de este escrito.

Y por supuesto a Dios, quien me ha permitido vivir para alcanzar mis metas.

	DESCRIPCIÓN	PÁG
INTRODUCCIÓN		3
1. ANTECEDENTES		7
1.1 Procedimientos de síntesis		9
1.2 Clasificación de los polímeros		11
1.3 Proceso de formación de vidrio		14
1.4 Comportamiento del polímero		15
1.5 Propiedades generales		17
1.6 Aditivos de los plásticos		25
1.7 Conformación de los polímeros		28
1.8 Plásticos sobre otros materiales de ingeniería		32
1.9 Punto de vista económico		33
1.10 Punto de vista ecológico		37
2. ASPECTOS GENERALES DE LOS GEOSINTÉTICOS		
2.1 Antecedentes		43
2.2 Geosintéticos		45
2.3 Descripción breve de los productos geosintéticos		47
2.4 Simbología estandarizada de los geosintéticos		59
2.5 Diagrama de funciones generales de los geosintéticos		61
3. GEOTEXILES		
3.1 Antecedentes		65
3.1.1 Organismos Normativos		67
3.2 Fabricación		68
3.3 Clasificación de los geotextiles		70
3.3.1 Clasificación de los geotextiles según su método de fabricación		70
3.3.2 Comportamiento físico en función del proceso de fabricación		73
3.4 Propiedades		74
3.4.1 Propiedades de los geotextiles y su relación con la función que desempeñan		76
3.5 Métodos de prueba aceptados por la industria		80
3.6 Aplicaciones		82
3.6.1 Separación		82
3.6.2 Refuerzo		83
3.6.3 Filtración		86
3.6.4 Drenaje		90
3.6.5 Barrera de líquidos (control de la permeabilidad)		91
4. GEOMEMBRANAS		
4.1 Antecedentes		97
4.1.1 Organismos Normativos		100
4.2 Fabricación		100
4.3 Clasificación de las geomembranas		103
4.3.1 Principales tipos de geomembranas		106
4.3.2 Otros tipos de geomembranas		111
4.4 Propiedades		111
4.4.1 Propiedades físicas		112
4.4.2 Propiedades mecánicas		115
4.4.3 Propiedades de durabilidad		118

DESCRIPCIÓN	PÁG
4.5 Métodos de prueba aceptados por la industria	121
4.6 Métodos de unión o de empalme de geomembranas	123
4.6.1 Métodos térmicos	124
4.6.2 Métodos químicos	126
4.6.3 Comprobación de uniones, soldaduras o juntas	128
4.7 Aplicaciones	129
5. USO Y APLICACIÓN DE LOS GEOSINTETICOS	
5.1 Métodos de diseño	133
5.1.1 Ejemplos de diseños por función	137
5.2 Parámetros de diseño para geotextiles	143
5.2.1 Función principal de separación	143
5.2.2 Función principal de filtración	145
5.2.3 Función principal de drenaje	145
5.2.4 Función principal de refuerzo	146
5.2.5 Función principal de protección	147
5.2.6 Función principal de impermeabilización	147
5.3 Uso y aplicación de los geosintéticos (geotextiles y geomembranas)	148
5.3.1 Procedimiento general de aplicación de un geotextil	148
5.3.2 Aplicación de geotextiles para sobrecarpetas asfálticas	149
5.3.2.1 Aplicación de geotextil para refuerzos de sello	150
5.3.3 Procedimiento general de instalación de una geomembrana	150
5.3.4 Aplicación de geosintéticos en un relleno sanitario	152
5.3.5 Evaluación de geomembranas para revestir un canal	160
5.3.6 Revestimientos de lagunas artificiales	162
6. CONCLUSIONES	167
Bibliografía	171

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de la ciencia y la tecnología ha propiciado que cada área del conocimiento sea cada vez más interesante y profunda. Es sorprendente cómo este desarrollo tan vertiginoso nos asombra originando que nos percatemos de lo poco que sabemos del mundo en que vivimos. Por naturaleza, el ser humano es curioso, cada vez que descubre algo nuevo siente la necesidad imperiosa de conocer, comprender, investigar más al respecto y trata de hacerlo público para compartir el conocimiento a la humanidad, y por qué no decirlo, para satisfacer su ego al quedar en el recuerdo de "alguien" que no lo conocía, pues todos queremos **permanecer de algún modo eternamente**, es decir, "dejar huella".

El siglo pasado tuvo grandes avances que permitieron que el hombre se desarrollara en forma versátil en diversas áreas como la medicina, la química, la genética y otras más, entre las que no puede faltar por supuesto la ingeniería. Dentro de la ingeniería destacan los avances en áreas como la ingeniería industrial, mecánico-eléctrica, en computación, petrolera y civil. Gracias a estos avances significativos se han logrado grandes obras y beneficios para la humanidad.

Este tema de tesis surge de la inquietud, durante una clase de mi último semestre escolar, cuando un profesor de geotecnia comentaba algunas aplicaciones en ingeniería de productos poliméricos (geotextiles y geomembranas). Me pareció interesante el tratar de comprender cómo los materiales sintéticos podían contribuir en el mejoramiento de las capacidades del suelo e incluso, suplantar en algunos casos, a materiales naturales en obras de ingeniería al competir no solo en cuanto a funciones sino en costo y manipulación del producto (tiempo). Por su amplia variedad, estos materiales han incursionado en diversas aplicaciones de ingeniería y agronomía, ya que brindan posibilidades que antes no se hubieran logrado fácilmente y con resultados muy satisfactorios, por lo que cada vez es mayor su aceptación y utilización, al tiempo que se conoce más respecto a ellos.

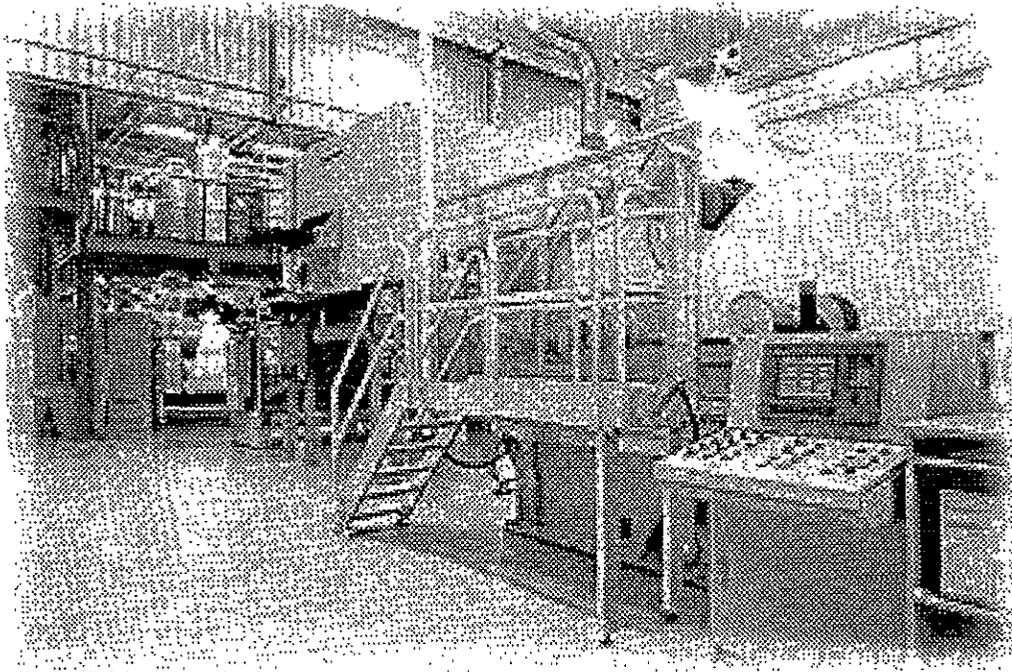
Toda obra de ingeniería implica grandes retos, entre los que destacan la funcionalidad, la responsabilidad del profesionista (ante los procedimientos de diseño, construcción, operación y mantenimiento), la innovación tecnológica, los beneficios y por supuesto las afectaciones o implicaciones de llevarla a cabo, tanto en el medio ambiente como en la sociedad, a corto, mediano y largo plazo. Esto conlleva a análisis multidisciplinarios complejos que al realizarlos determinan si la obra es factible o no, por lo que resulta obvio que se deben analizar varios proyectos para tomar la mejor decisión.

Por todo lo que representa lo antes citado, es natural que al surgir nuevos productos para la ingeniería, estos sean sujetos a severos estudios de investigación que se dan con mayor facilidad en países industrializados del primer mundo, donde existe gran apoyo a la investigación. Su aplicación y comercialización a nivel mundial resulta cautelosa hasta que se logra una mayor aceptación después de ver los logros alcanzados por los productos. Cada fracaso implica un nuevo reto al producto, el cual puede ser muy bueno pero estar mal empleado. Se puede hacer una analogía con los medicamentos: existen medicamentos muy buenos, pero que si no se toman adecuadamente no brindan los beneficios esperados por el paciente, incluso pueden presentarse complicaciones que en ocasiones producen la muerte, aún cuando el doctor haya dado las indicaciones precisas. Igual sucede en ingeniería, existen productos muy buenos, pero si no se tiene un control adecuado de los procedimientos desde el inicio de la obra, observando cuidadosamente las especificaciones del fabricante y del proyecto en cuestión, pudiera existir la posibilidad de que ni siquiera se concluya la obra.

Los productos geosintéticos han padecido de ello, pero han logrado salir adelante gracias a los resultados arrojados por la investigación cada vez mayor que se tiene al respecto, así como de los éxitos en obras importantes, contándose por menos los fracasos.

Este trabajo representa una investigación del desarrollo de los productos geosintéticos, partiendo de sus antecedentes, definiciones, características, hasta las funciones que son capaces de desempeñar en diversas obras de ingeniería. Se realizó una búsqueda amplia de información, con el fin de aclarar muchas dudas en cuanto a la terminología empleada en estos productos, que al ser nuevos generan la necesidad de crear nuevo vocabulario apropiado para ellos. Así mismo, se pretende hacer notar que no son productos cualesquiera, ya que han surgido especificaciones de prueba para las diversas funciones que son capaces de desarrollar, lo que propicia un ambiente de confianza para su uso.

La tesis consta de seis capítulos; en el primero se habla de los antecedentes de los productos poliméricos, características, métodos de obtención y algunos aspectos económicos y ambientales. En el segundo capítulo se comienza a hablar de los productos geosintéticos, se definen varios tipos de productos, dando sus características y aplicaciones generales. El tercer capítulo trata en forma específica a los geotextiles, sus antecedentes, características y propiedades, métodos de prueba y aplicaciones. El cuarto capítulo se desarrolla de manera similar al anterior, pero atendiendo a las geomembranas. El quinto capítulo expone algunos métodos de diseño, ejemplos, explica de forma general la aplicación particular en campo de los geotextiles y geomembranas, además, se mencionan algunas aplicaciones de estos productos en forma más detallada como es el caso de las carpetas asfálticas, los rellenos sanitarios donde se utilizan simultáneamente varios productos geosintéticos y algunas comentarios para revestimientos de canales y de embalses. Finalmente, se presenta el capítulo seis que son las conclusiones de este trabajo.



1. ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

La escasez y difícil obtención a través del tiempo de diversos materiales naturales, ha obligado al hombre a desarrollar ciencia y tecnología para elaborar nuevos materiales que los sustituyan; obviamente estos materiales deben superar a los naturales con características más favorables, entre las que se pueden mencionar la disponibilidad, manejabilidad, costos, resistencias mayores, entre otras.

Después de la primera guerra mundial, los requerimientos de la humanidad para satisfacer sus necesidades estimularon la creación de nuevos materiales que ya no podían obtenerse en forma natural, en parte por la gran demanda, pero debido también al incremento de la población que comenzaba a manifestarse.

Así surgen los materiales plásticos, los cuales han tenido un gran auge, ya que presentan características que han logrado superar las de algunos materiales naturales (madera, hule, vidrio, fierro, cobre, etc.), incluso se han combinado con materiales naturales en diversas aplicaciones.

La palabra plásticos deriva del griego "*plastikos*" que significa capaz de ser moldeado. Se denominan plásticos a un gran número de productos de origen orgánico y de alto peso molecular, que son sólidos en su estado definitivo, pero que en alguna etapa de su fabricación son suficientemente fluidos para moldearlos.

El desarrollo histórico de los plásticos comenzó cuando se descubrió que las resinas naturales podían emplearse para elaborar objetos de uso práctico. La mayoría de los plásticos son relativamente modernos, ya que hasta principios de este siglo sólo se empleaban los siguientes productos de origen orgánico moldeables por calor y presión y que pueden considerarse como antecesores de los plásticos modernos: goma laca, caseína, ebonita, celuloide y bitumen.

En América se usaba un material antes de la llegada de Colón, conocido como hule o caucho. El bitumen se utilizó en el Medio Oriente en la ornamentación de algunos edificios de antiguas ciudades de Sumeria. Se dice que la primer resina sintética fue el hule vulcanizado, obtenida por Charles Goodyear en 1839, al hacer reaccionar azufre con resina natural caliente; el producto obtenido resultó ser muy resistente a los cambios de temperatura y a los esfuerzos mecánicos.

En 1868, en los Estados Unidos surgió el primer plástico de importancia comercial, debido a un concurso para encontrar un material que sustituyera al marfil en la fabricación de las bolas de billar, pues en esa época se usaba tanto marfil que sacrificaban 12,000 elefantes anualmente para cubrir la demanda. Así, surgió el celuloide descubierto por John Wesley Hyatt, material con el que se fabricaron bolas de billar, peines y películas fotográficas.

Otro plástico semisintético que tuvo buena aceptación comercial fue el que desarrollaron Krishe y Spitteler en 1897, debido a la demanda de pizarrones blancos en escuelas alemanas. Este material se fabricó a partir de caseína, una proteína extraída de la leche desnatada que logró convertirse en un sólido semejante al cuerno, su principal aplicación fue la elaboración de botones.

El desarrollo del fonógrafo trajo consigo la necesidad de un material plástico para los discos y una composición basada en una resina natural, la laca, que se desarrolló alrededor de 1895.

Resinas como el betún, la gutapercha, la goma laca y el ámbar, son extraídas de ciertos árboles, y se tienen referencias de que ya se utilizaban en Egipto, Babilonia, la India, Grecia y China.

Fue en 1909, cuando el belga Dr. Leo H. Baekeland obtuvo una masa amorfa que fría, no fundía después de haber sido moldeada, que actuaba como no-conductor de la electricidad y que era altamente resistente a los agentes químicos, la llamó baquelita; es entonces que inicia la llamada "era de los plásticos". La baquelita llegó a ser la primera de un importante grupo de resinas sintéticas que se conocen ahora como fenólicas, y continúan siendo uno de los materiales plásticos más útiles. En esa época, Staudinger trabajaba en la fabricación del poliestireno y Otto Rhom enfocaba sus estudios al acrílico, que para 1930 ya se producían industrialmente.

Por su parte el PVC, aunque había sido sintetizado desde 1872 por Bauman, fue hasta 1920 que Waldo Semon al mezclarlo con otros compuestos, obtuvo una masa parecida al caucho; la comercialización del PVC inició en 1938.

Entre los años 30's y 50's, a causa de la 2ª Guerra Mundial surge la necesidad de desarrollar nuevos materiales con mejores propiedades, mayor resistencia, menor costo y que sustituyeran a otros que escaseaban. En este período surgieron el nylon, polietileno de baja densidad y el teflón. La década de los 60's se distinguió porque se fabricaron algunos plásticos mediante nuevos procesos, incrementando considerablemente la disponibilidad de materiales; en este período las resinas que destacan son las llamadas resinas reactivas como las epoxi, poliésteres insaturados y principalmente poliuretanos. En los 70's y 80's se inició la producción de plásticos de altas propiedades como las polisulfonas, poliariletercetonas y polímeros de cristal líquido.

La materia prima más importante para la fabricación de plásticos es el petróleo, otras materias primas son la madera, el algodón, carbón y gas natural. Los plásticos están constituidos por una resina básica que es la verdadera sustancia plástica, a la que se añaden una serie de compuestos químicos denominados aditivos, que modifican o refuerzan las propiedades de la resina.

Las resinas básicas de los plásticos se componen de grandes moléculas formadas por la reunión de cientos de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. El sufijo mero se refiere a la unidad, de modo que monómero indica una sola unidad y polímero una estructura de unidades múltiples. Monómero es la unidad química estructural que puede tomarse como mínimo común denominador de una resina. Polímero es un compuesto químico de peso molecular relativamente alto, formado por la combinación de compuestos de bajo peso molecular: los monómeros.

Peso molecular

La longitud de la cadena de moléculas está relacionada con el número de unidades químicas que se unen para formarla. Por lo tanto, si se toma el peso molecular de cada una de las unidades químicas y se multiplican por el número de ellas, se obtendrá el peso molecular del polímero.

Por ejemplo: El etileno pesa 28 gr/mol. Si el polietileno tiene 1000 unidades de etileno, su peso molecular será:

$$28 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 1000 = \underbrace{28,000 \frac{\text{gr}}{\text{mol}}}_{\text{Peso molecular}}$$

Al número de unidades químicas que forman la cadena del polímero se le conoce como grado de polimerización. En este caso, el polietileno tiene un grado de polimerización de 1000. Conforme se incrementa la longitud de las cadenas el polímero presenta una mayor temperatura de fusión y mejores propiedades mecánicas.

1.1 Procedimientos de síntesis

La reunión de las moléculas de los monómeros puede realizarse fundamentalmente por 3 procedimientos: polimerización, copolimerización, ambos llamados también polimerización por adición; y la polimerización por condensación.

Polimerización por adición (polimerización y copolimerización)

La polimerización consiste en el encadenamiento de las moléculas de los monómeros bajo la influencia del calor o luz, o más generalmente, de algún cuerpo que actúa como catalizador, en donde dos o más moléculas relativamente sencillas (monómeros) se combinan para producir moléculas muy grandes.

Los catalizadores son sustancias cuya presencia acelera una reacción sin que al menos teóricamente participen en ella. La polimerización va acompañada por un aumento de los puntos de ebullición de los líquidos y los de fusión de los compuestos sólidos.

Los plásticos obtenidos por polimerización de un sólo monómero, tienen en ocasiones defectos que limitan el campo de su aplicación. Así, en un principio se pensó en mezclar plásticos para obtener un producto de características medias, pero el resultado no fue satisfactorio; entonces se ensayó el mezclar los monómeros, obteniéndose un copolímero; y es a esta operación de polimerizar dos monómeros previamente mezclados la que se denomina copolimerización. Este es uno de los procedimientos más empleados en la tecnología de los plásticos, ya que los productos obtenidos presentan características sobresalientes. Las propiedades del copolímero pueden alterarse haciendo variar las proporciones de los ingredientes.

Polimerización por condensación o policondensación

Algunos compuestos químicos no polimerizan aisladamente, pero provocándoles una reacción polimerizan fácilmente. Se le ha llamado policondensación porque en la operación se desprenden algunas moléculas, generalmente de agua.

Tabla 1.1 Propiedades de los polímeros

NOMBRE	TIPO unidad	Resistencia a la tracción		Elongación %	Módulo de elasticidad ksi	Densidad g/cm ³	Absorción de agua % (a las 24hrs)	Resistencia a la temperatura de ablandamiento °C	Temperatura de transición vítrea T _g °C	Temperatura de fragilización T _f °F (°C)	Gravedad específica	Temperatura máxima de servicio (°C)	Características
		psi	kg/cm ²										
ABS (Acetionitrilo-butadieno-estireno de alto impacto)	termoplástico	4000-7000		5-20			0.2-0.45			(88-125)	1.04-1.06	83° a 264 psi	Resistente a los ácidos diluidos y al alcohol; lo daña el ácido sulfúrico concentrado; soluble en muchos solventes orgánicos. Excelente tenacidad, resistencia a la intemperie y buena resistencia a las distorsiones térmicas (inflamable).
Acetales	termoplástico										1.40		Resistencia y rigidez elevadas, vida de fatiga excelente, resistencia a solventes orgánicos y sales inorgánicas no oxidantes, a las irradiaciones, bajo coeficiente de fricción. Mala resistencia a la intemperie y baja a las quemaduras.
Acetato de celulosa (celulósico)	termoplástico	7000-8000	220-560	10	200-250	1.27-1.33	1.9-3.3	49-190			1.29	63° a 264 psi	Se disuelve en acetona y acetato etílico.
Acetato-butirato de celulosa (celulósico)	termoplástico		150-500	8-90		1.15-1.22	1-2	60-120					
Acrílicos	termoplástico	8000		4									
Celulósicos (acetato de celulosa, entrelazados)	termoplástico	2000-8000		5-50	200-250	1.30							Excelente transmisión de la luz, resistencia a la intemperie, baja absorción de agua. Propiedades mecánicas generalmente bajas, baja resistencia al desgaste por fricción, temperatura baja de ablandamiento.
Cloruro de polivinilideno	termoplástico	5000-9000	310-420	2-100	300-600	1.40							Muy buena tenacidad, buenas propiedades ópticas y resistencia a la intemperie, buena moldabilidad, resistente a las llamas.
Cloruro de polivinilo (PVC)	termoplástico	3500-5000	200-600	160-240	50-80	1.15	0.3	71	165 (74)	-1 (-20)	1.40	77° a 264 psi	Resistente al desgaste, ácidos y alcalis, lo afectan las cetonas, los esteroides y los hidrocarburos aromáticos.
Fluorocarburos	termoplástico										2.1-2.2		Muy inertes químicamente, extraordinariamente estables a temperaturas elevadas, tenaces, con bajo coeficiente de fricción y buenas propiedades dieléctricas. Malas propiedades mecánicas.
Poliarmidas (nylon)	termoplástico	11000-12000	320-740	60-300	400-500	1.06-1.19	0.5-3.5	232		(50)	1.0-1.5	105° a 264 psi	Resistencia excelente a la mayoría de los solventes orgánicos; no se usa con ácidos fuertes. Resistencia y rigidez elevadas, buena tenacidad, alta resistencia al desgaste por fricción.
Policarbonato	termoplástico	9000-11000	630-740	110-130	300-400	1.20	0.3-0.4	150		(145)	1.2-1.25	127° a 264 psi	Resistente al desgaste, ácidos y alcalis, los atacan los combustibles y los solventes orgánicos. Buena ductilidad y tenacidad, excelente aislamiento eléctrico, transparencia y baja absorción de agua.
Policlorotrifluoroetileno	termoplástico	4500-6000		80-250	150-300	2.15							
Poliéster (dacrón)	termoplástico	8000-10500	1700-3000	50-300	400-600	1.6-2.0	0.2-0.5	100-270		(75)	1.35	55° a 264 psi	Resistente a los aceites, alcohóles y esteroides; lo atacan los ácidos fuertes y bases.
Poliestireno (PS)	termoplástico	3200-8000	350-600	1-60	380-450	1.05-1.07	0.05	88-110		(85-125)	1.05	105° a 264 psi	No es resistente a los hidrocarburos aromáticos, clonados y muchos solventes orgánicos. Buena estabilidad térmica, propiedades eléctricas excelentes. Se degradan al exponerse a los rayos UVA.
Poliéster (acetato)	termoplástico	9500-12000		25-75	520	1.42				(-85)			
Poliétileno baja densidad (PEBD)	termoplástico	600-3000	110	50-800	15-40	0.92	0.01	100		(-120)	0.92	Se ablanda 12	Excelente a ácidos y bases a temperatura ambiental, excepto a los ácidos orgánicos y...
Poliétileno de alta densidad (PEAD)	termoplástico	3000-5500	375	15-130	60-180	0.96	0.02	200		(-120)	0.96	Se ablanda 80	Propiedades de aislamiento eléctrico excelentes, tenaces, coeficiente de fricción bastante bajo. Baja resistencia, poca rigidez, mala resistencia a rayos UVA e intemperie, inflamables.
Polimida	termoplástico	11000-17000		8-10	300	1.39							
Polimetacrilato (Plexiglas acrílico)	termoplástico	6000-12000	500-800	2-5	350-450	1.22	0.2-0.4	700-1000		220 (104)			Resistente a la mayoría de los ácidos y alcalis, incluso a distorsiones térmicas. Inertes químicamente a bajo costo, escasa absorción de agua, resistencia a la fatiga. Frágiles a baja temperatura, inflamables, mala resistencia a rayos UVA e intemperie.
Polipropileno (PP)	termoplástico	4000-6000		10-700	160-220	0.90				(-16)	0.91	57° a 264 psi	Resistencia alta a la mayoría de los químicos corrosivos y solventes orgánicos.
Poli tetrafluoroetileno (PTFE)	termoplástico	2000-7000	140-320	100-400	60-80	2.1-2.3	0	100-200			2.20		Excelente resistencia química y a la intemperie, buenas propiedades eléctricas, resistencia al desgaste por fricción y llamas, capacidad de amortiguamiento. Sensibilidad a la degradación térmica.
Vinilos	termoplástico										1.35-2.00		
Alílicos	termoestable												Excelentes propiedades dieléctricas, incluso en condiciones húmedas, estabilidad y control dimensional, estabilidad a altas temperaturas.
Alquidos	termoestable					1.2-2.4							Buena estabilidad dimensional, buena resistencia térmica, buenas propiedades eléctricas, mala resistencia a la humedad a temperaturas elevadas.

Tabla 1.1 Propiedades de los polímeros

NOMBRE	TIPO unidad	Resistencia a la tensión		Elongación %	Módulo de elasticidad ksi	Densidad g/cm ³	Absorción de agua % (a las 24hrs)	Resistencia a la compresión kg/cm ²	Temperatura de reblandecimiento °C	Temperatura de transición vidrio T _g (°C)	Temperatura de flam °C (°C)	Gravedad específica	Temperatura máxima servicio (°C)	Características
		psi	kg/cm ²											
Resinas	termoestables	5000-10000		0-1	1000-1600	1.50						1.5-2.0		Duros, rígidos, químicamente resistente a la mayoría de las sustancias, excepto los ácidos fuertes. Estabilidad térmica excelente, hasta las temperaturas de descomposición.
Fibras	termoestables	4000-15000	300-900	0-6	400-500	1.1-1.25	0.15-0.75	1000-1200	---			1.1-2.06	230-260	Resistencia alta a los álcalis del agua, menos resistentes a los ácidos y oxidantes. Excelentes propiedades eléctricas, baja absorción de la humedad
Fibras	termoestables	5000-9000		0-2	400-1300	1.27						1.3-1.8	150-180	Los ácidos fuertes y los álcalis los atacan severamente. Buenas propiedades eléctricas y mecánicas, excelente resistencia térmica.
Fibras	termoestables	3000-4500		---	1580	1.75								Los atacan los ácidos fuertes, los álcalis, cetonas y solventes. Buena resistencia térmica y a los medios atmosféricos y marinos. Si se refuerzan con fibras debe usarse un factor elevado de seguridad, por su falta de homogeneidad.
Fibras	termoestables	6000-13000		0-3	300-650	1.28						1.05-1.4	120-180	Excelentes propiedades eléctricas, buena estabilidad térmica, químicamente inertes
Cauchos	termoestables	3000-4000		0	1200	1.55	0					1.66-1.81		Resistentes a los ácidos débiles, álcalis, solventes, grasas y aceites
Plásticos	termoestables	7000										1.50	100	Los materiales espumados son excelentes aisladores térmicos y acústicos, tienen muy buenas propiedades de flotación. Resistencia a la oxidación baja por encima de 80°C. La humedad es perjudicial a las temperaturas
Resinas	termoestables	5000-10000		3-6	---	0.024-0.032								
Resinas	elastómeros	700		400	---	1.00								
Resinas	elastómeros	600-3000		600-2000	---	1.00								
Resinas	elastómeros	3500		---	---	0.94				(-90)				
Resinas	elastómeros	4000		350	---	0.92								
Resinas	elastómeros	3500		800	---	1.24				(-50)				
Resinas	elastómeros	3000		800	---	0.93				(-73)				
Resinas	elastómeros	350-1000		100-700	---	1.50				(-123)				

1.3 Proceso de formación de vidrio

A continuación se habla del proceso de formación de vidrio. Esto facilitará la comprensión del comportamiento de los polímeros en función de la acción que la temperatura ejerce sobre éstos.

Fase vítrea

Cuando un líquido se enfría a su temperatura de congelación, generalmente se convierte en un sólido cristalino. Algunos líquidos, por su compleja configuración molecular o por su lenta actividad cinética, no cristalizan a bajas temperaturas, sino que forman una estructura rígida llamada **vidrio**. En los materiales en que es posible la cristalización, dos factores determinan si al enfriarse el líquido, éste tomará la forma cristalina o se convertirá en vidrio. a) Si el enfriamiento es demasiado rápido, en principio todo líquido puede convertirse en vidrio. b) Si la base reticular de la estructura cristalina es difícil de obtener en la estructura líquida, la cristalización será lenta y se favorecerá la formación de vidrio. En los polímeros, el cambio en vidrio es la regla; la cristalización tiene un lugar secundario.

Para comprender el proceso de formación de vidrio, se empezará con un líquido estable, representado en la parte superior derecha de la figura 1.1. Supóngase que el líquido no cristaliza por enfriamiento al pasar por la temperatura de fusión T_f , sino que se convierte en un líquido metaestable y contrae o reduce gradualmente su volumen por enfriamiento continuado. Al llegar a la temperatura de transición a vidrio T_v (cuyo valor depende de la velocidad de enfriamiento), las unidades estructurales del material ya no son aptas para reorganizarse como líquido, y el material resultante es lo que llamamos **vidrio**. Algunos autores asignan la nomenclatura T_g a la temperatura de transición a vidrio.

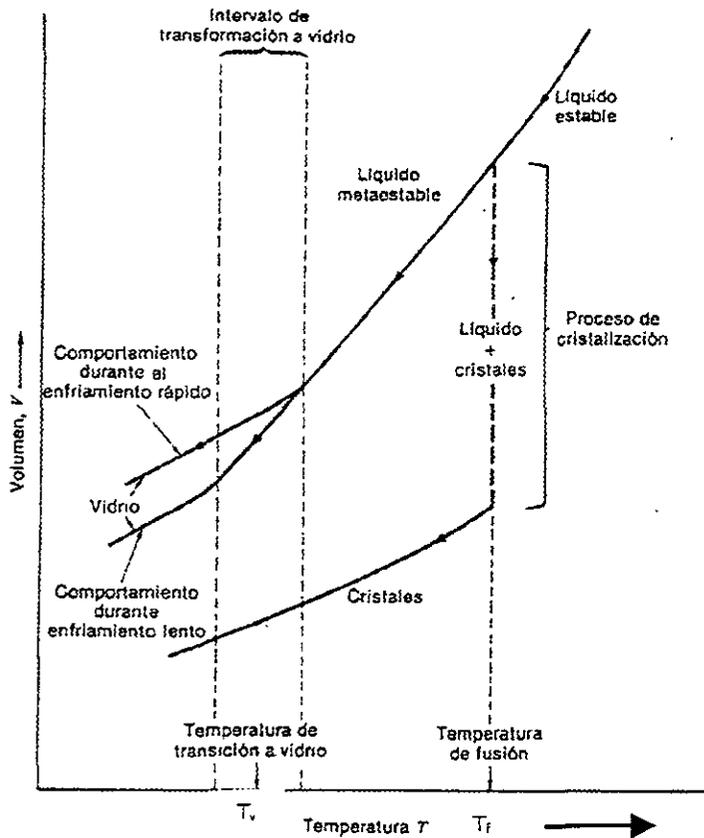


Fig 1.1 Cambios de volumen en un líquido durante la cristalización o en tránsito al estado vítreo en la región de temperaturas cercanas a T_v

La lentitud característica de la transición a vidrio se expresa de manera cuantitativa por el coeficiente de viscosidad $\eta = 10^5 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, que se define como:

$$\eta = \frac{\text{esfuerzo cortante}}{\text{rapidez de cambio de la deformación por corte}} = \frac{\frac{\text{fuerza}}{\text{área}}}{\frac{\text{velocidad}}{\text{espesor}}}$$

Ahora bien, las temperaturas a las que se usarán los polímeros, relativas a sus temperaturas de transición son muy importantes, puesto que la temperatura afecta directamente el comportamiento mecánico.

1.4 Comportamiento del polímero

Polímeros termoplásticos

Al igual que los metales, los polímeros pueden soportar deformación tanto elástica como plástica cuando se aplica un esfuerzo. La facilidad con la que ocurre deformación permanente está relacionada con la viscosidad del polímero. Los polímeros con alta viscosidad requieren de mayores esfuerzos para causar deformación plástica. Conforme se incrementa la temperatura, el polímero es menos viscoso y se deforma más fácilmente.

A muy altas temperaturas el polímero se quema o carboniza. Esta temperatura de degradación T_d , limita la utilidad del polímero y representa la temperatura superior a la cual el polímero puede ser conformado en una forma útil.

Cuando la temperatura de los polímeros termoplásticos es alta, la viscosidad es muy baja, y si se aplica una fuerza el polímero fluye prácticamente sin que ocurra una deformación elástica. La resistencia y el módulo de elasticidad son cercanos a cero. El polímero es adecuado para vaciado y muchos otros procesos de conformado (polímero líquido). Conforme disminuye la temperatura, se incrementa la viscosidad. Cuando la temperatura baja hasta la temperatura de fusión T_f , el polímero se vuelve rígido.

Polímeros Amorfos (estado plástico)

Por debajo de la temperatura de fusión el polímero es rígido y mantiene su forma, sin embargo, hay deformación cuando se aplica un esfuerzo. Cuando se retira dicho esfuerzo sólo se recupera la parte elástica de la deformación. La resistencia y el módulo de elasticidad son bajos pero el alargamiento es excepcionalmente alto. Se puede deformar el polímero en formas útiles moldeándolo o extruyéndolo en este intervalo de temperatura.

Conforme sigue descendiendo la temperatura ocurre una mayor deformación elástica y menos deformación viscosa; el polímero se comporta de manera similar al hule. En este intervalo de temperatura un cambio permanente en la forma del polímero es limitado. Su resistencia es mayor, el módulo de elasticidad aumenta y el alargamiento se reduce. El arreglo molecular de los polímeros amorfos permite el paso de la luz, razón por la que son transparentes o translúcidos generalmente.

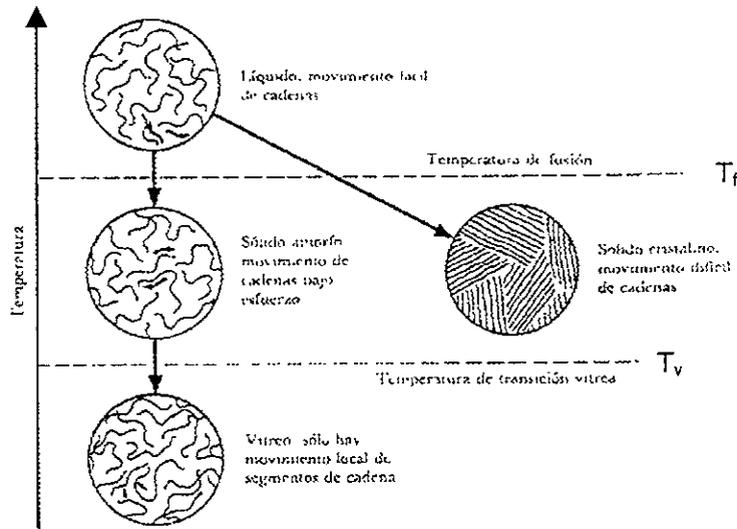


Figura 1.2 Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de los polímeros termoplásticos

Polímeros Vítreos (estado rígido)

Conforme continúa decreciendo la temperatura del polímero amorfo, la viscosidad es demasiado baja. Por debajo de la temperatura de transición vítrea T_v , el polímero se vuelve duro y frágil y se comporta de modo parecido a un vidrio cerámico. Normalmente las propiedades como el módulo de elasticidad o la densidad cambian a una velocidad diferente cuando la temperatura cae por debajo de T_v . A menudo, los polímeros son escogidos de modo que la temperatura de transición sea inferior a las temperaturas de servicio. La temperatura de transición vítrea está normalmente entre 0.5 y 0.75 veces la temperatura absoluta de fusión T_f .

Polímeros Cristalinos

Algunos polímeros se cristalizan cuando se enfrían a temperaturas inferiores a las de fusión; por lo tanto, los polímeros cristalinos se usan a temperaturas mucho menores que la temperatura de fusión, debido a los cambios en la estructura cristalina que se pueden presentar cuando se aproxima la temperatura de fusión. En realidad, la temperatura vítrea no es importante ya que sólo representa un cambio menor en el comportamiento.

A continuación se relacionan las temperaturas de fusión y de transición vítrea de varios polímeros.

POLÍMERO	T_f (°C)	T_v (°C)
<i>Polímeros por adición:</i>		
Poliestireno de baja densidad (BD)	115	-120
Polietileno de alta densidad (AD)	137	-120
Cloruro de polivinilo	175 - 212	87 - 82
Polipropileno	168 - 176	-34
Poliestireno	230 - 240	85 - 125
Poliacrilonitrilo	320	107
Teflón	327	-
Policlorotrifluoretileno	220	-
Polimetilmetacrilato (acrílico)	-	90 - 105

POLÍMERO	T _f (°C)	T _v (°C)
ABS	-	88 - 125
Polietileno	135	-68
<i>Polímeros por condensación:</i>		
Acetal	181	-85
6,6-nylon	265	50
Acetato de celulosa	230	-
Policarbonato	230	145
Poliéster	255	75
<i>Elastómeros:</i>		
Silicón	-	-123
Polibutadieno	120	-90
Policloropreno	80	-50
Poliisopreno	30	-73

Elastómeros

Ciertos polímeros muestran una gran deformación elástica cuando se les aplica una fuerza, estos son los elastómeros. La deformación puede desaparecer completamente cuando se elimina el esfuerzo. Un ejemplo típico es el de la banda elástica (liga).

Polímeros termoestables

Los polímeros termoestables se obtienen a menudo en forma de dos resinas líquidas, cuando las dos partes son mezcladas se inicia la reacción de entrelazamiento. En otros casos se emplean calor y presión para iniciarla. La mayoría de los polímeros termoestables tienen alta resistencia, baja ductilidad, alto módulo de elasticidad y baja resistencia al impacto en comparación con otros polímeros.

1.5 Propiedades generales

Las materias primas de los plásticos que pudiéramos denominar primarias, es decir, de las que se obtienen los plásticos son: el petróleo, la hulla, la cal, el aire, el agua, la sal, el azufre y una gran cantidad de productos agropecuarios que cada día va en aumento, entre los que se encuentra la leche, la madera, la soya, la paja de cereales, etc.

En la actualidad, el petróleo es el principal proveedor de materias primas para los plásticos; por lo que la industria del aprovechamiento de sus subproductos es una rama muy importante de la química denominada petroquímica.

Cabe señalar, que la moderna industria de los plásticos se encuentra capacitada para utilizar como materia prima cualquier subproducto industrial o residuo agrícola que no tenga aprovechamiento y que se le ofrezca en cantidad y precio aceptable, ya que día a día se descubren nuevos materiales de los que se obtienen compuestos intermedios (como el fenol, el formaldehído, la urea, la melamina, la caseína, la celulosa, etc.) adecuados para la obtención de alguna resina plástica.

Estos compuestos intermedios pueden o no obtenerse de una sola materia prima; es decir, cada plástico se obtiene por varios procedimientos y cada país selecciona el que más convenga de acuerdo a su disponibilidad de materia prima o al precio que pueda adquirirla.

La gran flexibilidad existente de los procesos de fabricación de los plásticos y la facilidad del aprovechamiento de las materias primas disponibles más dispares, son dos de los factores más importantes que han colocado e impulsado esta industria dentro de los primeros lugares de la fabricación industrial de todos los países.

Resistencia química

El ataque de los productos químicos en los polímeros es, con mayor frecuencia, interna y entraña reblandecimiento, engrosamiento y pérdida de resistencia del material. Los polímeros pueden ser afectados por los solventes en diversos modos: disolución, hinchamiento, permeabilidad, reventamiento o rotura por esfuerzos ambientales y agrietamiento. Conforme aumenta el peso molecular del polímero disminuye su solubilidad o tendencia a hincharse en un solvente particular

Por lo regular, los polímeros presentan una mayor resistencia al deterioro provocado por los ácidos y los alcalis que los metales. Todas las poliolefinas, los polímeros PVC, ABS, los fluorocarbonos, el poliestireno y otros, tienen una resistencia excelente a todos los ácidos y alcalis.

Permeabilidad

La permeabilidad a gases y líquidos guarda relación íntima con la resistencia química del polímero, así mismo depende del grosor del producto y temperatura de exposición final. La difusión puede intensificarse por una solución de gases o líquidos, en algún componente de la estructura del polímero como los plastificadores. El CO₂ tiene una permeabilidad mucho mayor a través de casi todos los polímeros que el O₂ y aún mayor que el nitrógeno, lo cual se debe tal vez a su capacidad de ser absorbido por materiales que permiten el paso fácil del agua. El agua en sí puede actuar como plastificador que contribuya a la hinchazón del polímero y la distensión o alojamiento de su retículo.

La permeabilidad de los polímeros es un factor importante en la aplicación de estos productos, como hojas o láminas en la industria del empaqueo, para recipientes de plástico, para recubrimientos y hojas resistentes a la corrosión, en la industria eléctrica, y como membranas en procesos industriales, constructivos, biológicos y tratamiento de desechos, y otras obras civiles (hidráulicas) que involucren el factor agua.

Propiedades viscoelásticas

Los polímeros son el grupo de materiales más grande cuyas propiedades mecánicas exhiben características tanto de sólidos elásticos como de líquidos viscosos, es decir, presentan características de tipo viscoelástico. El comportamiento viscoelástico se demuestra con varios tipos de experimentos.

Por ejemplo, si una barra de polímero de longitud unitaria se carga axialmente y se mantiene por breve tiempo a un esfuerzo constante, se origina una deformación correspondiente. Si se descarga el espécimen en este momento, se comportará en forma elástica y no habrá un cambio permanente en la longitud. Sin embargo, si mantenemos el esfuerzo en la barra desde $t=0$ hasta algún tiempo $t=x$, se produce un incremento adicional de la deformación. Cuando se descarga la barra, el incremento adicional de deformación permanece como una deformación permanente (plástica), conociéndosele a este fenómeno en ocasiones como flujo plástico. El flujo plástico es la deformación continua de un material sujeto a un esfuerzo constante.

Si la barra antes descrita se esfuerza hasta producir una cantidad dada de deformación correspondiente a Δf , el esfuerzo necesario para conservar y mantener esta deformación disminuirá con el tiempo. A este fenómeno se le conoce como la relajación del esfuerzo. En muchos polímeros, la relación entre el esfuerzo y el tiempo se puede expresar:

$$\sigma_t = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$$

donde:

- σ_0 esfuerzo inicial
- σ_t esfuerzo en el tiempo t
- t tiempo
- λ tiempo de relajación

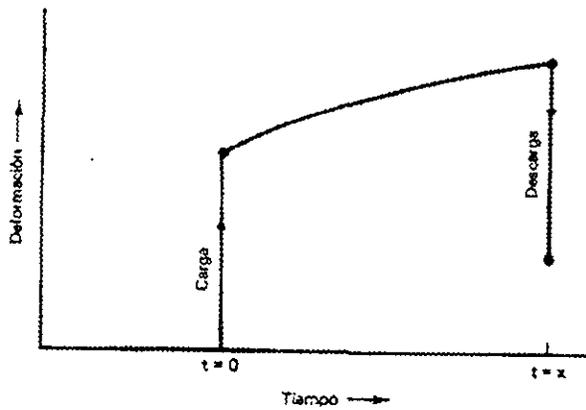


Figura 1.3 Incremento de la deformación con el tiempo en un espécimen sujeto a esfuerzo constante

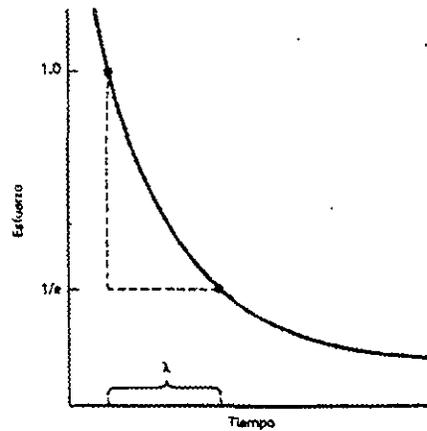


Figura 1.4 Relajación de esfuerzos

El tiempo de relajación λ es el tiempo que se requiere para reducir el esfuerzo hasta $1/e$ de su valor inicial. Por lo tanto, la relajación del esfuerzo es la disminución continua del esfuerzo necesario para mantener una deformación dada.

La capacidad de un polímero para relajarse depende del movimiento molecular, el cual aumenta cuando se incrementa la temperatura, por lo tanto, a temperaturas más altas decrecen los tiempos de relajación de esfuerzos de acuerdo con la ecuación clásica de Arrhenius:

$$1/\lambda = e^{-Q/RT}$$

- T = temperatura ($^{\circ}\text{K}$)
- R = constante = 1.98 (cal/mol $^{\circ}\text{K}$)
- Q = energía de activación (cal/mol)

Las temperaturas a las que se emplearán los polímeros, relativas a sus temperaturas de transición, son muy importantes, ya que la temperatura afecta de modo directo el comportamiento mecánico.

Fatiga

El ensayo de fatiga en su forma más simple requiere la preparación de unas muestras con superficies pulidas, efectuando ensayos a diversos niveles de esfuerzo para obtener una curva E-N que relacione E (esfuerzo necesario para que falle) a N (número de ciclos).

Como es de esperarse, mientras menor es el esfuerzo mayor es el número de ciclos para que se presente la falla.

La relación de fatiga o de límite de fatiga se define como la relación de la resistencia a la fatiga sobre la resistencia a la tensión (o tracción) y tiene valores entre 0.45 y 0.25 dependiendo del material.

La resistencia a la fatiga también se ve muy afectada por:

- Concentración de esfuerzos debido a posibles muescas o melladuras.
- Rugosidad superficial del material.
- Esfuerzo residual en la superficie.
- Condiciones ambientales tales como corrosión.

Resistencia a la tensión (o tracción)

En los termoplásticos las mayores resistencias a la tensión se obtienen en grupos como nylons, acrílicos, acetatos y policarbonatos, del orden de 9,000 a 10,000 lb/in².

Las resinas termoestables muestran niveles más altos de resistencia a la tensión que las olefinas sencillas.

La resistencia de los epóxicos (10,000 lb/in²) y los uretanos (5,000 lb/in²) iguala la de los mejores termoplásticos.

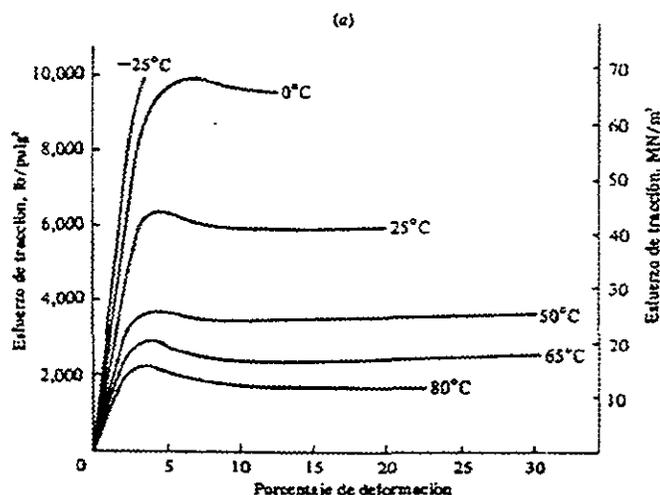


Figura 1.5 Efectos de la temperatura en la curva esfuerzo de tensión (tracción)-deformación del acetato de celosa.

A continuación se citan algunos datos de resistencia a la tensión.

Material	Resistencia a la tensión lb/pulg ²	Resistencia/Peso** lb/pulg ² /(lb/pulg ³)
Acero SAE 1010 estirado en frío	53,000	156
ABS	6,500	170
Nylon 6/6	11,800	290
Polietileno (alta densidad)	4,400	127

** Resistencia a la fluencia en los metales o resistencia a la tensión en los plásticos (en lb/pulg²) dividida por la densidad (lb/pulg³).

Porcentaje de alargamiento

En general, cuando se ensayan los termoplásticos a su temperatura de transición o por debajo de ella, se obtiene un gran alargamiento. Además, la introducción de altas tasas de deformación también tenderá a producir un menor alargamiento. Lo fundamental es conocer si el alargamiento puede ocurrir durante el intervalo de tiempo del ensayo a una temperatura particular.

Dureza

Generalmente, esta propiedad se determina por medio del instrumento Rockwell pero en una escala especial para los plásticos, así puede decirse que la mayor dureza es más o menos indicativa de mayor resistencia, aunque aquella no sea un indicador fiel de la resistencia al desgaste.

Impacto

Un ensayo de impacto es un ensayo de alta tasa de deformación, lo cual da una buena ilustración de como un material que es dúctil a la tasa de deformación, en un ensayo de tensión puede volverse frágil a tasas mayores. Por ejemplo, el ABS presenta un alargamiento del 20 al 80% pero poca resistencia al impacto.

Módulo de elasticidad

En los materiales plásticos, el módulo cambia drásticamente según el tiempo del ensayo y a lo largo de una gama de temperatura razonablemente amplia alrededor de la temperatura ambiente. Existe también una gran diferencia en los módulos entre los plásticos.

Cabe señalar, que los valores de los módulos en los plásticos son CIENTOS de veces más pequeños que los de los metales y los materiales cerámicos, por lo tanto, se debe tener mucho cuidado si se substituye un plástico por un metal en una pieza muy semejante sujeta a deflexión. Los módulos de los materiales termoestables rígidos son considerablemente mayores que los de los termoplásticos.

Por otro lado, es importante resaltar la baja gravedad específica de los plásticos comparado con otra clase de materiales, ello nos lleva a relaciones favorables de resistencia con respecto al peso y rigidez.

Es importante señalar que el coeficiente de expansión en los plásticos es de 2 a 17 veces mayor que en un material típico como el hierro, esto significa que si se substituye un plástico por un metal en una parte con tolerancia estrecha, se debe dar el margen necesario.

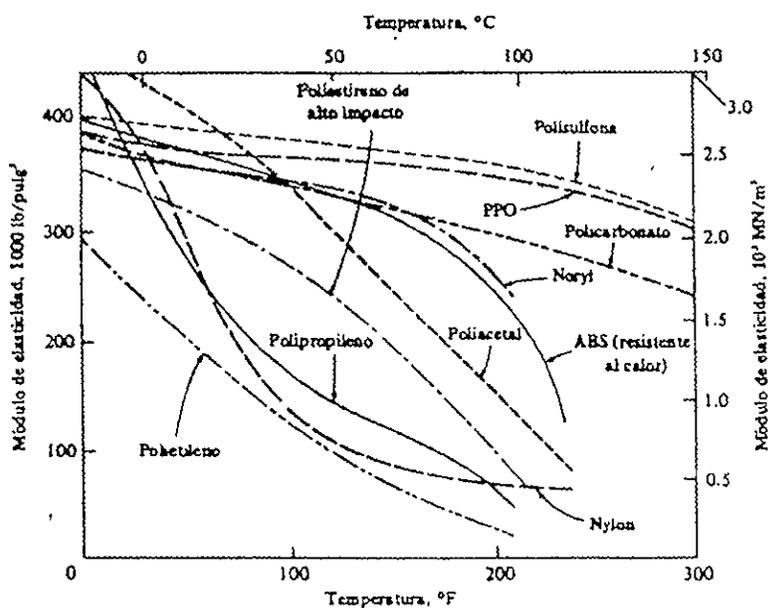


Figura 1.6 Efectos de la temperatura en módulo de elasticidad de varias resinas.

Efectos de la temperatura

Los efectos de la temperatura son un factor importante que debe considerarse al aplicar materiales polímeros. Uno de los ensayos más comunes es el conocido **ensayo de impacto de Charpy**. Una barra cuadrada con una ranura en "V" se golpea por medio de un brazo oscilante y se mide la energía absorbida. Es relativamente sencillo medir los efectos de la temperatura; si se sumergen previamente varias muestras en líquidos a diferentes temperaturas y llevándolos rápidamente a la máquina de ensayo. El tipo de datos obtenidos se observan esquemáticamente en la figura 1.7.

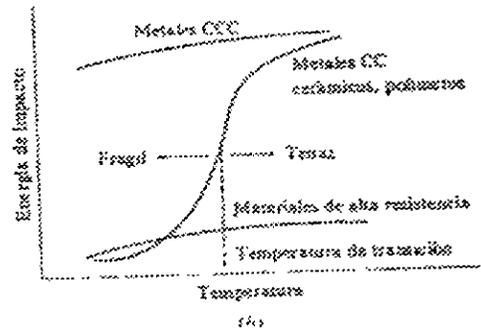


Figura 1.7 Efecto de la temperatura en la resistencia al impacto de varios materiales (forma esquemática).

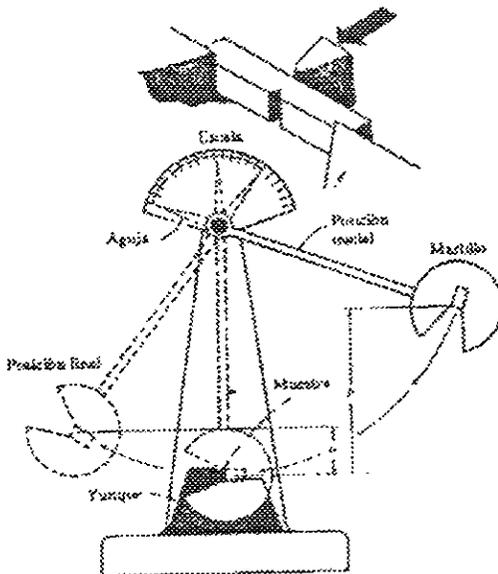


Figura 1.8 Forma en la cual opera un ensayo de impacto Charpy.

Debemos remarcar que existe una gran variación en las temperaturas de transición para diferentes materiales. Para los metales y polímeros está entre -200° y 200°F (-129° y 93°C) mientras que para los cerámicos está por encima de 1000°F (538°C).

Por otro lado, recordemos que al enfriarse un pedazo de vidrio por debajo de la gama de fusión, todavía es plástico durante un intervalo de temperatura pero, finalmente llega a una temperatura en la cual se vuelve rígido, ésta se denomina **temperatura de transición**. El mismo fenómeno se encuentra durante el enfriamiento de un material termoplástico, y sin embargo, cuando el plástico alcanza la temperatura de transición se denomina **temperatura de transición a vidrio T_v** .

Cuando un líquido se enfría a su temperatura de congelación, generalmente se convierte en un sólido cristalino. Sin embargo algunos líquidos debido a su compleja configuración molecular o por su lenta actividad cinética, no cristalizan a bajas temperaturas, sino que forman una estructura rígida denominada vidrio.

La **cristalización** es una transición de 1er orden y se caracteriza por cambios discontinuos en variables importantes como el volumen específico, la capacidad térmica y otras propiedades físicas. Algunos polímeros se cristalizan cuando se enfrían a temperaturas inferiores a la de fusión. Cabe señalar que la estructura cristalina de un polímero resiste la deformación plástica hasta que la temperatura se acerca al punto de fusión. Por lo tanto, la presencia de cristalinidad afecta el comportamiento mecánico y eléctrico de los polímeros. En la mayoría de los polímeros el cambio en vidrio es la regla, la cristalización tiene un papel secundario.

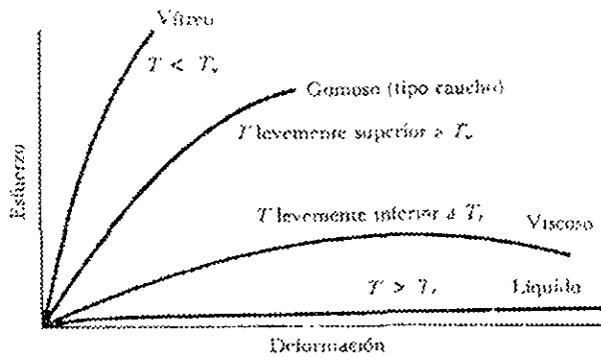


Figura 1.9 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento esfuerzo deformación del polímero termoplástico.

En el empleo de polímeros, la temperatura para que ocurra una fractura frágil (alargamiento menor del 1%) se puede hallar por medio de ensayos de tensión así como de impacto. En el caso del ensayo de tensión a velocidades bajas, se encuentra comportamiento frágil a temperaturas bastante inferiores a T_v , la temperatura de transición a vidrio.

La explicación estructural para que los polímeros desarrollen una temperatura frágil es que por encima de esta temperatura, el campo de esfuerzos adelante de la grieta tiene que hacer un mayor trabajo desenrollando y desplazando moléculas, en forma análoga a la deformación plástica en metales. Por debajo de la temperatura frágil, la ruptura ocurre con un mínimo de estos desplazamientos y la energía total necesaria para la ruptura es menor.

Un gran inconveniente en los polímeros como materiales de ingeniería es su resistencia relativamente pequeña y su baja estabilidad térmica. Se han realizado importantes esfuerzos para desarrollar y crear nuevos polímeros con características más eficientes.

Los vapores producidos por degradación térmica de polímeros son a veces desagradables, y en algunos casos, peligrosos, particularmente el cloruro de polivinilo, el cloruro de polivinilideno y el neopreno, utilizados en laboratorios técnicos, ya que pueden emitir pequeñas cantidades del gas tóxico fosgeno (COCl_2).

Fricción y desgaste

El comportamiento de los plásticos ante la fricción es muy complejo, se caracteriza por la interacción de los materiales involucrados en el fenómeno, la estructura superficial, el lubricante, la carga específica (efectos de la compresión de las superficies entre sí) y la velocidad de desplazamiento (en su caso). Una aplicación típica son los rodamientos, los más importantes están formados por el par plástico-acero. Un factor a considerar en este caso es el desprendimiento de calor a través del elemento metálico. Por otra parte, la característica más importante del desgaste es que es impredecible. Aún así, los problemas de desgaste se pueden enfrentar razonablemente si se conocen los mecanismos de desgaste, haciendo observaciones cuidadosas de las partes que afectará.

Envejecimiento acelerado

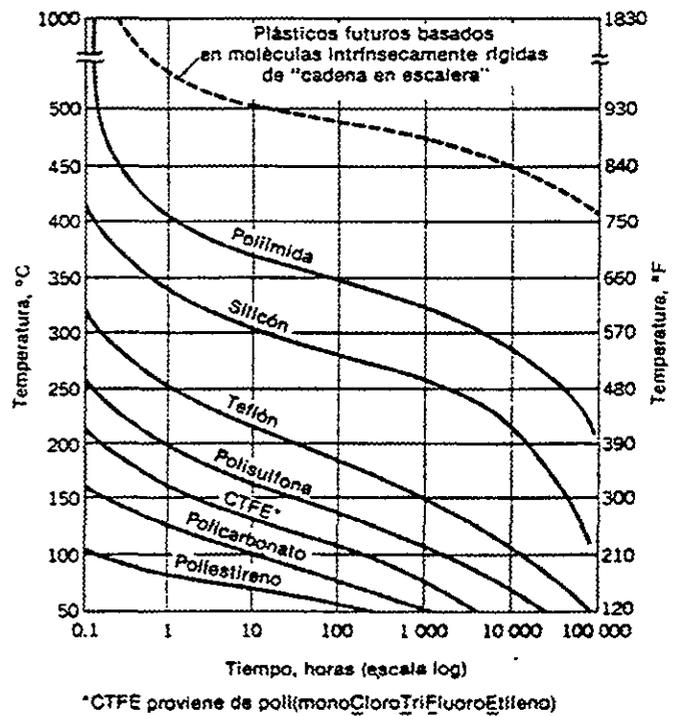
Existe la creencia de que los plásticos son inalterables y de duración eterna, lamentablemente no es así, los plásticos envejecen y llegan a la destrucción. Los agentes agresivos son diversos: oxígeno, luz UV, productos químicos (por su naturaleza o comportamiento), abrasivos, fatigas, sobreesfuerzos, etc.

Todo ello con el posible agravante de circunstancias derivadas de la propia fabricación (ligera degradación, tensiones latentes, diseños poco afortunados, procesos de acabado agresivos, etc) y manipulación. La suma de todos estos efectos conlleva a la degradación del material, que se conoce como envejecimiento.

El envejecimiento de los materiales se manifiesta por la pérdida de las propiedades mecánicas, tales como resistencia a la tensión, impacto y flexión; o bien propiedades como transparencia, brillo, color, entre otras; llegando a la aparición de microfisuras, grietas o incluso roturas. Un ejemplo de envejecimiento, son los cambios en el polímero debidos a modificaciones en la estructura química causados principalmente por la radiación ultravioleta (UV) asociada a la luz solar. Esta acción asociada con el oxígeno producen reacciones de foto-oxidación que afectan al polímero. Para proteger al polímero de este tipo de degradación se han desarrollado aditivos conocidos como estabilizadores UV, los cuales se usan en concentraciones de 0.5% a 2.0%. Las pruebas de envejecimiento acelerado se utilizan para comparar la efectividad de los estabilizadores UV.

Figura 1.10 Curvas que dan los límites de tiempo y temperatura aproximados para el uso estructural de plásticos más representativos.

Las curvas marcan la duración en servicio a la que se retiene todavía 50% de una propiedad de tiempo corto (como resistencia a la fluencia) a temperatura dada.



Como se observa, estos agentes agresores son conocidos, así como sus efectos; por lo tanto se pueden prever y tomar las medidas oportunas para evitarlos, o al menos minimizarlos hasta límites admisibles. En cualquier caso de aplicación se producirá un envejecimiento progresivo del producto, pero tomando en cuenta los aspectos antes citados se puede hablar de un tiempo de vida, el cual puede ser muy largo dependiendo del proyecto y material de que se trate.

1.6 Aditivos de los plásticos

Las resinas base de los plásticos se utilizan puras para algunas aplicaciones, pero generalmente se les agregan ciertas sustancias naturales y artificiales que modifican o refuerzan sus propiedades, incluso el costo. Estas sustancias reciben el nombre de aditivos; siendo los principales los plastificantes, los estabilizadores, los colorantes, los lubricantes, los agentes antiestáticos, los agentes espumantes, los retardantes de la combustión o llama, los rellenos y los agentes reforzadores.

Plastificantes

Los plastificantes son compuestos orgánicos de baja tensión de vapor que forman con las resinas (materiales poliméricos) unas soluciones estables en frío, que aumentan su plasticidad en caliente. Se usan solventes con altos puntos de ebullición, aceites no volátiles y materiales resinosos. Existen tres tipos generales de materiales utilizados como plastificantes:

- Aceites vegetales (de tipo no secante).
- Productos químicos monoméricos con puntos de ebullición elevados.
- Materiales resinosos poliméricos con bajo peso molecular.

Se usan en los termoplásticos para mejorar la flexibilidad y reducir las características de fragilidad. Los plastificantes son líquidos que tienden a evaporarse de los objetos acabados, al pasar los años, lo cual provoca el aumento de la fragilidad y encogimientos. Los mejores plastificantes son los menos volátiles. Estos productos tienden a escapar de los compuestos de vinilo, y en este caso, pueden decolorar materiales adyacentes o reaccionar con ellos.

El uso de plastificantes para hacer que los objetos sean menos frágiles se reduce a los termoplásticos, ya que las características de fragilidad de los materiales termoestables son el resultado del *entrelazamiento de las moléculas*.

La cantidad de los plastificantes agregados controla las propiedades finales de los plásticos. Por ejemplo, el cloruro de polivinilo (PVC) se produce en tres formas: como material rígido no plastificado, como producto rígido parcialmente plastificado y como un polímero flexible con consistencia de caucho.

En el sector industrial de los plastificantes, actualmente existen más de 80 empresas en nuestro país; los principales centros de producción se localizan en los estados de Veracruz, Nuevo León, Tamaulipas, México, Tlaxcala y Puebla.

Estabilizadores y aditivos para propósitos especiales

Los estabilizadores o catalizadores son compuestos químicos o mezclas de compuestos que se añaden a la resina para dificultar su polimerización o policondensación, y asegurar así sus propiedades iniciales. Existen también aditivos especiales que se agregan para evitar la descomposición y el deterioro de los polímeros bajo la acción de la luz ultravioleta, la atmósfera y otros factores externos del medio ambiente, así mismo, para obtener características específicas como una resistencia a la oxidación, resistencia a la degradación térmica entre otros.

Por ejemplo, se usan fenoles para retardar la oxidación de los polímeros. El negro de humo (material de relleno muy efectivo en los neumáticos) se usa para impedir la penetración de los rayos ultravioleta y la degradación de los polietilenos.

Los antioxidantes son una clase especial de estabilizadores que evitan o inhiben la oxidación de la resina polimérica. Estos aditivos suelen ser compuestos (fenoles, aminas aromáticas, aminofenoles, aldehidos y cetonas) que presentan preferencia para reaccionar con el oxígeno del aire.

Colorantes

Los colorantes son compuestos minerales u orgánicos usados para dar color a la resina base. Se les conoce comúnmente como tintes y pigmentos. Los tintes son sustancias orgánicas solubles en los polímeros, son materiales de bajo costo, capaces de proporcionar una coloración intensa. Desgraciadamente, son sensibles al calor y no pueden usarse cuando las temperaturas de moldeo sobrepasan los 400°F (200°C). Además, las moléculas de los tintes se difunden en algunos polímeros y pueden contaminar materiales adyacentes.

Los pigmentos que son insolubles, pueden ser orgánicos e inorgánicos. Los pigmentos orgánicos no se difunden tan fácilmente como los tintes, ni son tan sensibles al calor, pero están limitados al respecto. Los pigmentos inorgánicos son los más estables de los materiales colorantes, no los afectan las temperaturas de moldeo y son muy resistentes a la luz y la intemperie.

Lubricantes

Los lubricantes son compuestos generalmente orgánicos, utilizados para facilitar el desmoldeo de los plásticos, se emplean en cantidades muy pequeñas inferiores al 2%. Los lubricantes como la cera o el estearato de calcio reducen la viscosidad del plástico fundido y mejoran las características de conformabilidad o procesabilidad.

Agentes antiestáticos

La mayoría de los polímeros, debido a que son malos conductores eléctricos, generan electricidad estática. Los agentes antiestáticos atraen mayor humedad del aire hacia la superficie del polímero, mejorando la conductividad superficial del polímero y reduciendo la posibilidad de una chispa o descarga eléctrica.

Agentes espumantes

Algunos polímeros incluyendo el uretano y poliestireno, pueden ser expandidos en forma de espuma con huecos celulares. El polímero es producido inicialmente en forma de pequeñas gotas sólidas que contienen el agente expansor o insuflador. Cuando las gotas son calentadas, el polímero se vuelve plástico, el agente se descompone formando un gas dentro de la gota y las paredes de ésta se expanden. Cuando las gotas preexpandidas se introducen en un molde caliente, se juntan y pegan entre sí para producir una forma determinada. Las espumas expandidas son excelentes materiales aislantes con una densidad excepcionalmente baja.

Retardantes de la combustión o llama

La mayoría de los polímeros por ser materiales orgánicos son inflamables. Los aditivos que contienen cloruros, bromuros, fósforos y sales metálicas, reducen la posibilidad de que ocurra o se extienda la combustión.

Cabe señalar que la mayor parte de los polímeros en su forma pura, a excepción del poli(tetrafluoretileno), las poliamidas, la melamina-formaldehido y algunos otros polímeros aromáticos resistentes a las temperaturas elevadas; son afectados por el fuego.

Sin embargo, el número de polímeros autoextinguibles es mucho mayor e incluye a los poliésteres clorados, los nylones, los óxidos de polifenilo, los policarbonatos, polisulfonas y silicones. A fin de incrementar el retardo de la ignición a un polímero dado, se utilizan ciertos aditivos como compuestos de antimonio o de fósforo, fosfatos clorados y polifosfonatos entre otros. Las parafinas halogenadas se han utilizado ampliamente en la industria desde hace mucho tiempo.

Rellenos y agentes reforzadores

Con el fin de contrarrestar los efectos de debilitamiento de los plastificadores, se agregan rellenos y diversos agentes reforzadores.

Las llamadas cargas entran dentro de los rellenos; son sustancias minerales como el talco, mica, sílice, amianto, fibra de vidrio; o vegetales como la harina de madera, el papel, algodón, etc. que mejoran algunas propiedades de las resinas poliméricas y bajan su precio de costo.

Los rellenos son partículas finas o fibras que se añaden a los polímeros para modificar las propiedades mecánicas del material tales como la resistencia intrínseca, la resistencia al impacto y otras como la resistencia al calor, la estabilidad dimensional, el aislamiento térmico. Además sirven para incrementar el volumen y reducir costos. Por ejemplo, usando aditivos finos de asbesto pueden mejorarse el aislamiento térmico y la estabilidad dimensional.

El coeficiente de fricción se reduce, mediante la adición de grafito (que absorbe también los rayos ultravioleta, mejorando la resistencia a los rayos del sol) o disulfuro de molibdeno. La conductividad eléctrica y térmica mejora con el empleo de rellenos metálicos.

El negro de humo o carbón que se añade al hule, y se utiliza en los neumáticos, mejora mucho su tenacidad y resistencia al desgaste. Otros rellenos como el óxido de zinc y el óxido de titanio se usan como pigmentos para impartir color al polímero básico.

En algunos casos, utilizando como relleno el aserrín de madera o arcilla, la función principal del relleno es dar cuerpo y disminuir costo al minimizar la cantidad de resina empleada en el producto. Por otra parte, la adición de esfuerzos a las resinas poliméricas provoca el mejoramiento de las propiedades mecánicas, tanto de los materiales termoestables como de los termoplásticos.

El principal material de refuerzo es el vidrio usado en forma de filamentos, fibras tejidas u orientadas al azar. El asbesto también es un material importante de refuerzo, pero debido a su elevado costo su uso está restringido a aquellas aplicaciones en las que es de gran relevancia la resistencia al fuego, o si se requiere de un aislamiento térmico especial. Además, los plásticos termoestables (termofijados) se refuerzan a menudo con sisal, algodón, nylon, fibras metálicas, telas y papel.

1.7 Conformación de los polímeros

Los procesos usados para conformar polímeros en formas útiles dependen en gran medida de la naturaleza del polímero, en particular, de si es termoplástico o termoestable; así como de la geometría del objeto acabado. Es interesante observar las numerosas similitudes existentes entre los procesos de fabricación de los metales y los plásticos.

En la mayoría de los procesos, el polímero se somete a esfuerzos tangenciales y de tensión intensos, usualmente en estados de fusión o cercanos a la fusión, esto produce la deformación y orientación de las cadenas del polímero.

Para conformar los polímeros termoplásticos se usa una gran diversidad de procesos. El polímero es calentado a una temperatura cercana o superior a la temperatura de fusión, de modo que el polímero se haga plástico o líquido. El polímero es entonces fundido o inyectado dentro de un molde, o forzado a pasar dentro o a través de un dado o boquilla para producir la forma requerida.

En cambio, existen pocos procesos para la conformación de polímeros termoestables, debido a que una vez que ha ocurrido la polimerización y se ha establecido la estructura reticular, dichos polímeros no se pueden conformar más.

Además, la presencia de rellenos y otros aditivos puede alterar en forma considerable las características reológicas del polímero derretido. Por lo regular, los polímeros derretidos se comportan como materiales seudoplásticos cuya viscosidad disminuye en forma rápida al incrementarse la velocidad del esfuerzo tangencial o cortante.

El moldeo es uno de los procesos modeladores más utilizados. Una gran parte de los artículos fabricados se obtienen por moldeo de las resinas, generalmente en forma granulada, a las que se añade la carga en polvo en el momento de realizar su conformación. La conformación de los plásticos por moldeo se realiza principalmente por extrusión, moldeo por compresión, moldeo por inyección, moldeo por transferencia y por colada ordinaria.

Muchos de los problemas que surgen durante el moldeo, en especial en el de inyección, son producidos por los cambios rápidos en el volumen y la densidad del polímero con respecto a la presión y temperatura. El incremento en la densidad al disminuir las temperaturas a una presión constante, produce una compacción considerable en el polímero, la cual en algunos casos, puede producir grietas e imperfecciones en el artículo moldeado. Además, esto produce deformaciones dentro de la masa interna que afectarán las propiedades mecánicas y la resistencia al calor del polímero.

Por otro lado, el enfriamiento no uniforme de un polímero dentro del molde contribuye a las deformaciones por congelación. La presencia de deformaciones por congelación produce frecuentemente una multitud de grietas en forma de placas muy pequeñas, casi infinitesimales en la superficie del plástico. Este fenómeno se conoce como agrietamiento; también puede ocurrir como resultado de una carga tensil que actúe en el plástico por un tiempo prolongado. Otro efecto de deformación por congelación es una disminución en la temperatura de descomposición del plástico.

Moldeo por extrusión

En este proceso se utiliza un tornillo mecánico, el cual obliga a pasar al compuesto termoplástico sólido a una zona de calentamiento, donde se produce la fusión. Después el líquido viscoso se extrae por un orificio conformado, a un transportador o mesa de escurrimiento. El material que sale de la máquina de moldeo por extrusión se enfría, por medio de dispositivos tales como sopladores, atomización de agua o la inmersión en un depósito de agua. El moldeo por extrusión es útil para conformar piezas de material termoplástico, tales como láminas, filamentos, varillas y tubos.

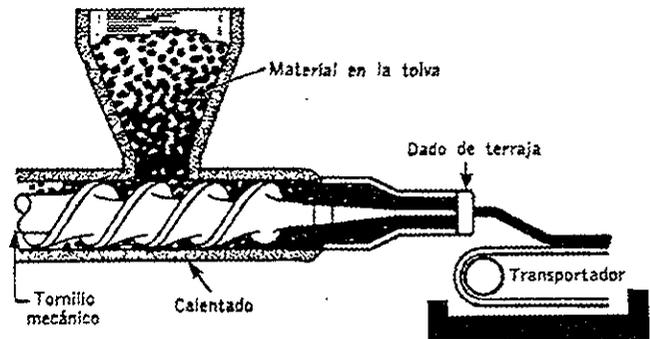


Figura 1.11 Moldeo por extrusión

Las secciones transversales de los filamentos, las varillas y los tubos pueden alterarse cambiando la forma del dado. Por este procedimiento se recubren también de plástico cables metálicos que pasan concéntricamente por una boquilla cilíndrica.

Moldeo por compresión

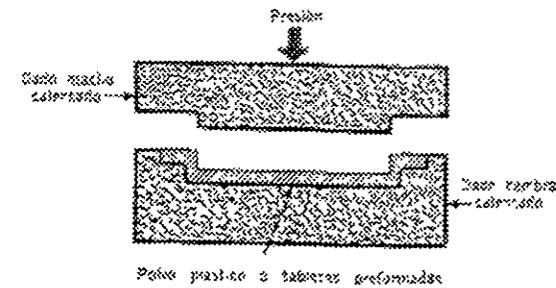


Figura 1.12 Moldeo por compresion

Es un proceso similar al prensado en caliente de los metales en polvo. Se introducen cantidades definidas de resina termoestable, relleno y otros ingredientes en la cavidad de un molde que tenga la forma deseada. Se calientan las dos piezas del dado, el macho y la hembra, habitualmente por medio de vapor.

El calentamiento previo acorta el ciclo de tiempo durante el moldeo, aumenta la vida útil del dado, reduce los requisitos de presión y da como resultado un producto más uniforme y con menos posibilidades de contener gases aprisionados.

Las temperaturas de moldeo se encuentran entre 270°F (130°C) y 360°F (180°C), con presiones que varían de 1,500 a 8,000 lb/pulg². Los requisitos de presión y temperatura se determinan por la clase de resina, el tipo de relleno o refuerzo, el tamaño y la forma del objeto y si se utiliza o no calentamiento previo. Los objetos termoplásticos deben estar suficientemente fríos, con el fin de que no sufran distorsiones al sacarse del molde. En el moldeo por compresión esto sólo puede realizarse por medio de ciclos alternados de calentamiento y enfriamiento, costosos y que consumen mucho tiempo; por lo tanto, los termoplásticos no pueden conformarse económicamente por este proceso de moldeo.

Moldeo por inyección

Este proceso es análogo al moldeado en matriz de los metales. El compuesto termoplástico para moldear se mete a una tolva de la que pasa a un cilindro superior de la máquina moldeadora. Un golpe de un pistón mide la cantidad apropiada de compuesto que pasa del cilindro superior a otro inferior.

Un ariete situado en el cilindro inferior, obliga a la carga a pasar a una cámara de calentamiento. Allí, el polvo granular se convierte en plástico y se introduce a presión, por medio de una boquilla, y como líquido viscoso, a la cavidad del molde.

Este último se enfría por medio de un fluido, que lo mantiene por debajo de la gama de fusión del compuesto. La presión se mantiene sobre el plástico hasta que se haya enfriado lo suficiente para solidificarse.

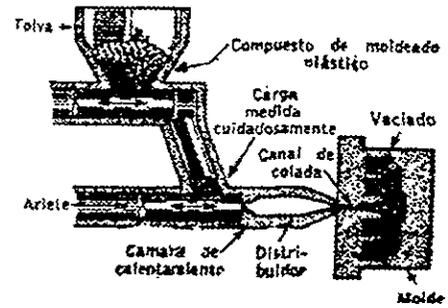


Figura 1.13 Moldeo por inyección

A continuación, se abre el molde y se saca el objeto. El proceso se emplea principalmente para resinas termoestables, aunque se ha desarrollado una modificación, denominada moldeo a chorro para este tipo de resinas.

Moldeo a chorro

Se diferencia del de inyección en que es preciso calentar la cavidad del molde, para curar el plástico introducido en él. La boquilla caliente con la que se ablanda inicialmente el plástico, antes de echarlo al molde, se encuentra caliente sólo poco antes y durante el tiempo en que se vierte el plástico al molde. Después de esa fase del ciclo, se enfría con rapidez para evitar que se cure el plástico que haya quedado en ella. Como en el moldeo por inyección, la presión se mantiene hasta que se endurece el plástico que se encuentra en el molde. El moldeo por chorro tiene sólo una aplicación limitada. El moldeo por compresión permite la producción de piezas más complejas que el de chorro o el de inyección, y permite una mayor flexibilidad, en lo que respecta a los rellenos y aditivos.

Moldeo por transferencia

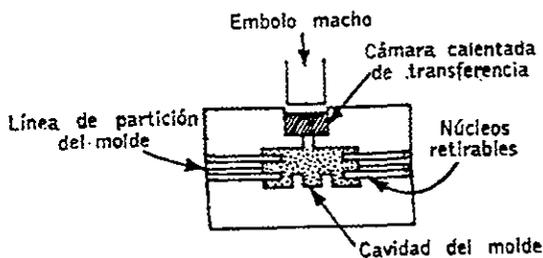


Figura 1.14 Moldeo por transferencia

Es una modificación del moldeo por compresión y el de inyección, se usa para producir piezas de resinas termoestables, en las que el diseño incluye formas delicadas o complejas o inserciones situadas en puntos críticos. Si estos objetos se hicieran por compresión, la aplicación de presión al polvo sólido en la cavidad del molde, podría dar como resultado la rotura o distorsión de partes delicadas de dicho molde, o en una mala alineación de las inserciones.

Además, como el molde cierra herméticamente antes de colocar en él los ingredientes, la pieza acabada puede hacerse con tolerancias más estrechas y esencialmente no hay plástico inicial en la línea de partición. Para aprovechar este proceso de moldeo, se pone primero la resina sólida en un cazo de transferencia, donde se calienta hasta fundirse. A continuación, se introduce a la fuerza en la cavidad del molde calentado, distribuyendo uniformemente la presión sobre toda la superficie y evitando las dificultades antes descritas. Como en el moldeo por compresión, se mantiene la presión hasta que la curación es completada; entonces se abre el molde y se saca el objeto terminado. Este procedimiento mejora notablemente las características de las propiedades de los plásticos con mucha carga.

Moldeo por colada ordinaria

Este proceso es similar al de los metales; se emplea principalmente para el moldeo en estado líquido (fundido) de las resinas, ya que muchos polímeros pueden ser colados en moldes, lo cual les permite solidificar dentro de los mismos. Los moldes pueden ser placas de vidrio para producir hojas gruesas individuales de plásticos o bandas móviles de acero inoxidable para la colada continua de hojas más delgadas. Este proceso es de los más económicos.

Estampado

Término análogo aplicado a los procesos conocidos como estiramiento o estampado profundo en el trabajo de láminas metálicas. El estampado implica ya sea el estiramiento de una lámina de material termoplástico sobre una forma o un grabado forzado, por medio de un émbolo a través de un dado o matriz.

Soplado

Similar al proceso de mismo nombre utilizado en la industria del vidrio. Se moldea el material termoplástico por medio de aire o presión y calor.

En este proceso se utiliza la materia prima de resina o del material ya transformado en forma de tubo o lámina.

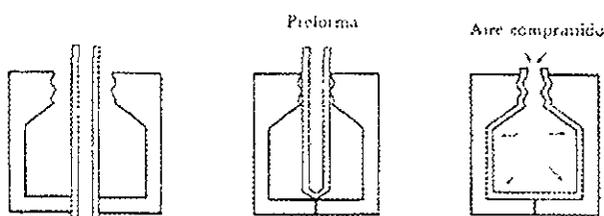


Figura 1.15 Soplado

En uno de los procedimientos un tubo de material se coloca en un molde fino deslizante y se hace que se dilate hasta llenar todos sus contornos, o bien, se coloca una lámina del material sobre el borde de una matriz y por soplado de aire o vapor a presión se hace que se adapte a la forma interior de aquella.

Conformado al vacío

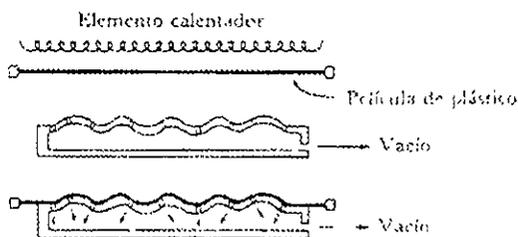


Figura 1.16 Conformado al vacío

Las láminas termoplásticas calentadas dentro de la región plástica se colocan sobre un molde o patrón conectado a un sistema de vacío.

Las pequeñas rendijas en el molde o patrón, permiten que el vacío tire de la hoja caliente de plástico sobre el patrón. Una aplicación singular de ésta técnica es el proceso para la fabricación de moldes en la industria del moldeo metálico.

Calandrado

En una calandra, se vierte plástico fundido entre un grupo de rodillos con una pequeña abertura. Los rodillos generan una delgada capa o película de polímero. Gran cantidad de laminados de cloruro de polivinilo se fabrica de este modo. Empleado para polímeros termoplásticos.

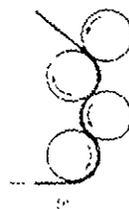


Figura 1.17 Calandrado

Hilado

Los filamentos y fibras pueden ser producidos a través del hilado, que en realidad es un proceso de extrusión.

El polímero termoplástico es forzado a pasar a través de una boquilla o dado que contiene muchos pequeños agujeros. El dado llamado hilador, puede girar y producir una fibra o cordón.

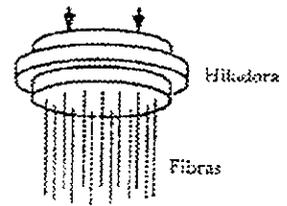


Figura 1.18 Hilado

Laminado

Se usa para combinar hojas de materiales, tales como papel, tela, fibras de vidrio y madera, con plásticos. En un método, se pasan materiales absorbentes a una solución de resina y solvente. Al retirarse, el solvente se evapora de las láminas impregnadas mediante calentamiento. El calor lleva a cabo una cura parcial. Se apila el número deseado de hojas y se coloca la pila entre dos láminas de acero muy pulidas. La presión y el calor se aplican de tal modo, que la cura se lleva a cabo total o parcialmente, como se desee. El laminado adquiere el acabado de la superficie de acero. Los materiales no absorbentes, tales como las chapas de madera, se recubren superficialmente con resina, por medio de un rodillo esparcido de cola, una brocha, la atomización o inmersión; después se apilan las hojas y se curan de la manera antes descrita.

Posforjado

Se aplica a laminados termoplásticos o termoestables parcialmente curados. Los laminados se calientan y estiran, o se introducen forzosamente a moldes o matrices bastante simples. Los laminados se enrollan también sobre un mandril, para producir tubos. El calor empleado para el ablandamiento de los laminados termoestables parcialmente curados, completa también la cura; lo que implica que el forjado se realice eficientemente en el corto intervalo entre el ablandamiento y el endurecimiento final.

Se producen hojas delgadas de material termoplástico, colando o pulverizando en solución, sobre una barda de acero inoxidable, una solución de resina. Después de la evaporación del solvente, la película se enfría, se retira y se prepara para su envío en rollos. Otro método para formar hojas termoplásticas delgadas es insuflar aire a tubos extruídos calientes, a medida que salen de la máquina de extrusión. La presión del aire determina la cantidad de la expansión y ésta, a su vez, regula el espesor de la hoja. También se producen hojas termoplásticas por medio del satinado, que es esencialmente una operación de laminado.

1.8 Plásticos sobre otros materiales de ingeniería

Desde el punto de vista químico, los plásticos son generalmente más resistentes a las agresiones del medio ambiente que atacan a los metales, al concreto y la madera a temperaturas atmosféricas. En general, los plásticos resisten los ataques del agua dulce, salada o freática y soportan eficientemente los ataques atmosféricos si se protegen de los rayos ultravioleta UV. Tienen una resistencia bastante buena a los ataques de ácidos inorgánicos, sales y bases, aunque, en general deben evitarse las sustancias muy oxidantes.

Las resinas termoestables (termofijadas) son, a menudo, más resistentes que las termoplásticas a los ataques de solventes orgánicos. Con excepción del nitrato de celulosa (celulosa y pólvora), que es muy inflamable, la mayoría de los plásticos son incombustibles y se apagan solos, o en el peor de los casos, arden con mucha lentitud.

Las propiedades físicas más importantes de los plásticos incluyen la gravedad específica que varía entre 1.0 y 2.0 para la mayoría de las sustancias poliméricas, esta propiedad es importante para calcular las relaciones entre la resistencia y el peso. Cabe mencionar que el costo de un volumen dado de plástico es competitivo con el de los metales, calculado por volumen. Todos los polímeros orgánicos son dieléctricos y tienen muy buenas propiedades de aislamiento térmico. Relativo a las propiedades ópticas varían de muy transparentes a opacos; aunque los plásticos resisten generalmente los ataques del agua, casi todos absorben cantidades variables de ese líquido.

Las propiedades mecánicas se ven afectadas notablemente por los materiales presentes en el objeto, así como por el compuesto polimérico que se utilice. Los módulos de elasticidad de los plásticos rígidos son más bajos que los del concreto. En general, las resinas termoestables carecen de ductilidad, y los termoplásticos van de frágiles a la temperatura ambiente, a muy dúctiles. En ciertos aspectos, los plásticos dúctiles son similares a los materiales metálicos, en lo que se refiere a su respuesta a las condiciones de carga. Los índices más elevados de carga de tensión hacen aumentar el límite elástico. La elevación de la temperatura de prueba tiende a provocar la disminución del límite elástico y el módulo de elasticidad. Las cargas aplicadas durante largo tiempo dan como resultado tendencias a la fluencia, provocando fallas con cargas más bajas que las indicadas por las pruebas a corto plazo. Las cargas de fatiga provocan fallas con cargas menores que las condiciones de carga estática a corto plazo.

1.9 Punto de vista económico

El sector transformador de plásticos es el último eslabón de la cadena petroquímica. Los plásticos forman el grupo de mayor producción de todos los petroquímicos secundarios y se caracterizan por la introducción continua de nuevos artículos y aplicaciones. La 2ª guerra mundial impulsó la evolución de esta industria, buscando materiales sintéticos que sustituyeran a los naturales, lo que favoreció los adelantos tecnológicos.

En 1990, la producción mundial de plásticos alcanzó los 100 millones de toneladas y para el año 2000 se esperaban 160 millones de toneladas. Cabe señalar, que el consumo de plásticos sólo se encuentra por abajo del consumo de hierro y acero, pero debe considerarse que estos tienen una densidad entre seis y siete veces mayor a la de los plásticos.

El consumo de los plásticos seguirá creciendo, pues están abarcando mercados del vidrio, papel y metales debido a sus buenas propiedades y su relación costo-beneficio.

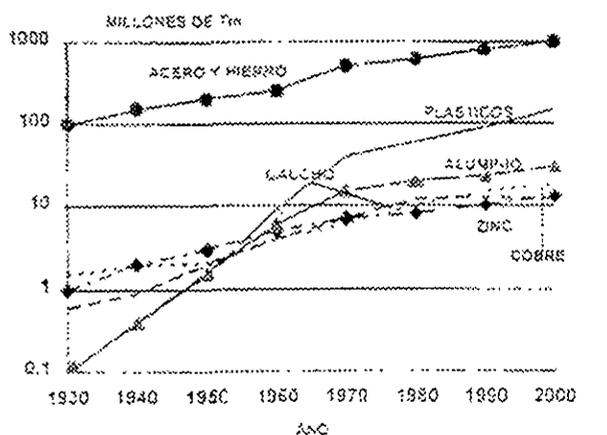


Figura 1.19 Consumo mundial de materias básicas

El sector de manufacturas plásticas es factor multiplicador de la economía, porque en la cadena de transformación del petróleo y gas natural, provee de insumos a 52 de las 73 ramas de la actividad económica. En 1991, se procesaron un millón 360 mil toneladas y su uso aumenta en otros sectores como construcción, automovilístico, calzado, empaque y embalaje, electrónica, agrícola, pinturas y adhesivos. Cabe señalar que el sector está rezagado con respecto a los países desarrollados.

En 1997, México ocupó el 4º lugar como productor mundial de petróleo, con alrededor de un millón de barriles diarios. Esta producción hubiera podido alcanzar mayores utilidades convirtiéndose en productos petroquímicos y plásticos. Es decir, al invertir un millón de pesos en la extensión de petróleo se obtienen 800 mil pesos de utilidad. Invertir esa misma cantidad en petroquímicos genera 1.2 millones de pesos y al hacerlo en la transformación de los plásticos se obtienen 15 millones de pesos. Esta una razón del porqué los países industrializados, a pesar de no contar con petróleo tienen altos ingresos de divisas. Además, dentro de la petroquímica, las fibras y las resinas sintéticas representan el mayor valor económico de México.

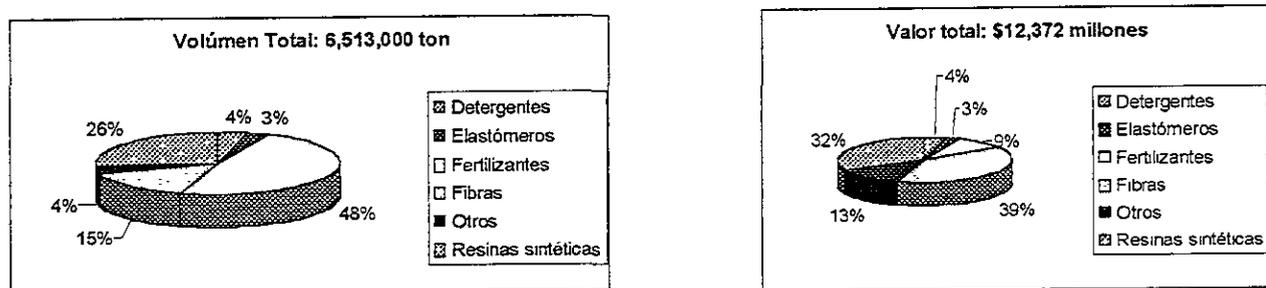


Figura 1.20 Valor económico de productos petroquímicos

En las siguientes tablas no se consideran las resinas epóxicas, copolímero VCM-VAM y polimetacrilato de metilo, debido a que existe únicamente un productor nacional de este tipo de resina y no se contiene información confiable.

Tabla 1.2 Producción y consumo aparente de resinas

Resina	Producción (ton)			Consumo Aparente (ton)		
	1998	1999	Variación %	1998	1999	Variación %
Termoplástica	1,761,946	1,897,765	7.7%	2,202,551	2,546,662	15.6%
Termofija	418,377	457,649	9.4%	408,778	439,707	7.6%
Total	2,180,323	2,355,414	8.0%	2,611,329	2,986,369	14.4%

Tabla 1.3 Importación y exportación de resinas

Resina	Importación (ton)			Exportación (ton)		
	1998	1999	Variación %	1998	1999	Variación %
Termoplástica	913,791	1,172,587	28.3%	473,186	523,690	10.7%
Termofija	25,638	24,631	-3.9%	35,237	42,573	20.8%
Total	939,429	1,197,218	27.4%	508,423	566,263	11.4%

Tabla 1.4 Índice de volúmen físico de la producción manufacturera por rama de actividad económica (1993=100)

Rama	1994	1995	1996	1997	1998	1999 p
Petróleo y derivados	105.7	98.9	99.9	98.6	103.7	106.6
Petroquímica básica	108.3	113.0	107.9	95.2	83.3	72.3
Resinas sintéticas y fibras químicas	105.6	114.2	127.3	137.1	148.7	153.0
Productos de hule	105.3	94.6	111.2	122.4	137.5	137.9
Artículos de plástico	106.4	98.8	110.9	124.1	129.3	134.9

p=preliminar

Tabla 1.5 Consumo total de resinas sintéticas (ton)

	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Producción	1,687,834	1,709,659	1,839,934	2,011,328	2,180,323	2,355,415
Importación	532,782	401,703	530,643	741,748	939,429	1,197,218
Exportación	330,338	452,297	481,656	482,032	508,423	566,265
Consumo aparente	1,890,278	1,659,065	1,888,921	2,271,044	2,611,329	2,986,368
Incremento del consumo aparente	14.5	-12.2	13.9	20.2	15.0	14.4
Capacidad instalada	1,257,000	1,532,100	1,590,500	1,812,600	2,134,000	nd

nd=no disponible

De acuerdo al consumo, en función de la importancia comercial y aplicaciones, los plásticos se clasifican en:

1. Commodities. Plásticos de mayor consumo, precio moderado.
2. Versátiles. Plásticos intermedios, se caracterizan por requerir alta creatividad para el diseño de productos, principalmente en aspectos de apariencia, color y forma, usados en la construcción para domos y cancelería, anuncios luminosos, casetas telefónicas, calaveras de autos, etc.
3. Técnicos o de ingeniería. Plásticos que tienen un alto desempeño funcional, con excelente conjunto de propiedades tales como resistencia mecánica y límites de temperatura elevados. Son significativamente más caros.
4. Especialidades. Normalmente asociados a una o más propiedades sobresalientes, por ejemplo: bajo índice de fricción, elevada resistencia dieléctrica y sobretodo un elevado precio, ocupan el menor porcentaje en el consumo global de plásticos.

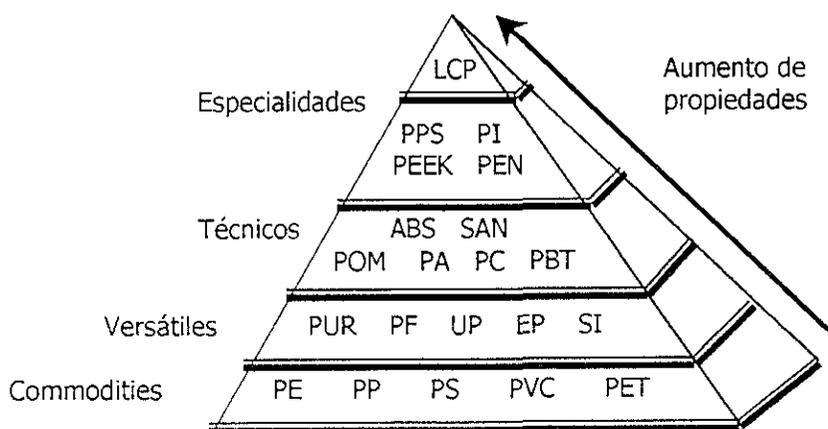


Figura 1.21 Representación gráfica en función de la importancia comercial

Las cuatro resinas básicas más importantes son: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC); son termoplásticas y están dentro del grupo *commodities*, representan alrededor del 68% de la producción mundial. El polietileno tereftalato (PET) se usa en botellas para bebidas gaseosas, película para envase, fotografía, cintas magnéticas.

En las economías de mercado, el uso de las resinas *commodities* creció a tasa anual de 8.7% en 1975-1980, de 5.7% en 1980-1987 y de 4.9% en 1987-1989. Por la consciencia ecológica tienden a moderar su consumo, a incrementar su reciclaje y a investigar su biodegradabilidad.

En México, el desarrollo y auge de estos productos comienza en los 50's y la producción tiene tasas de crecimiento superiores a las del PIB. Hay más de 80 compañías y 11 concentran cerca de las tres cuartas partes. Somos dependientes de las importaciones de ciertas materias primas. Los principales productos fabricados son PVC, PS, polietileno de alta y baja densidad (PEAD y PEBD), poliuretano y uréicas. Las *commodities* cubren el 74% del total de las resinas que se elaboran.

Desde mediados de los 80's se exporta cerca del 20% de la producción nacional. Las importaciones con respecto al consumo total varían entre el 20% y 35%. Estados Unidos es el principal socio comercial: 45% del valor de las ventas y más del 80% de las compras.

Fibras artificiales y sintéticas (FAS)

Inicialmente, las FAS se usaron para sustituir a las fibras naturales debido a los problemas de escasez, actualmente las desplazan en ciertos usos donde sus características son superiores (resistencia alta a la rotura, bajo poder de absorción de agua, etcétera).

Ante la demanda internacional de FAS, que aumenta de 13.7 millones de toneladas en 1980 a 17.6 en 1989, y con la tendencia hacia la apertura mercantil, se espera mayor intercambio mundial, manteniéndose dicha demanda frente a las fibras naturales a lo largo de la década. Sin embargo, las fibras sintéticas ganan espacio a las artificiales.

A continuación se presentan unas tablas informativas.

Tabla 1.6 Industria del plástico en México

Concepto	1965	1970	1975	1980	1985	1990
Consumo aparente (miles de toneladas)	110	200	375	856	1,020	1,260
Población (millones)	43.5	51.0	60.0	69.0	75.0	81.0
Consumo per capita (kg)	2.5	4.0	6.0	12.5	13.5	15.5
Número de establecimientos	n.d.	n.d.	990	1,600	2,500	2,900
Personal Ocupado (miles)	n.d.	n.d.	34	58	90	120

n.d. No disponible

Fuente: Departamento de Estudios Económicos de BANAMEX, con datos de la Asociación de la Industria Química, México Social y Plasticomunicación

Tabla 1.7 Mercado de plásticos 1989

Empaques y envases	46.5%
Adhesivos, recubrimientos y pinturas	9.5%
Construcción	8.5%
Doméstico	8.0%
Mueblero	7.0%
Electrodoméstico	3.0%
Juguetes y artículos de recreación	3.0%
Automovilístico	2.5%
Eléctrico y electrónico	2.5%
Otros	9.5%

Fuente: Departamento de Estudios Económicos de BANAMEX, con datos del Instituto Mexicano del Plástico Industrial

Tabla 1.8 Asimetrías en la industria del plástico (1989)

	México	Estados Unidos
Valor del mercado (millones de dólares)	2,200	70,000
Consumo (miles de toneladas)	1,200	24,000
Consumo per capita (kg)	15	90
Número de empresas	3,000	14,500
Número de trabajadores	120,000	455,000
Trabajadores/empresa	40	31
Ventas por empresa (dólares)	758,620	4' 827,586
Ventas por trabajador (dólares)	18,333	153,846
Transformación de plástico por trabajador (toneladas)	10	53

Fuente: Departamento de Estudios Económicos de BANAMEX, con datos de Plasticomunicación

1.10 Punto de vista ecológico

El consumo a nivel mundial de materiales poliméricos ha ido en aumento año con año; este desarrollo ha sido posible gracias a la versatilidad de estos materiales que ha posibilitado su empleo en campos de aplicación tan dispares como puedan ser embalaje y envase, alimentos, agrícola, farmacéutica, construcción o electrónica. Como todos los productos de nueva aparición, durante varios años han estado buscando su sitio entre y junto a los materiales tradicionales, como madera, vidrio, papel y metal.

Como ya se mencionó, los materiales poliméricos o plásticos son productos petroquímicos, ya que tienen al petróleo como materia prima, el cual es un recurso no renovable. En su fabricación, así como en su incineración se producen muchos tóxicos que envenenan el ambiente. En los últimos años, el gobierno se ha involucrado más en los problemas de la contaminación y se ha preocupado por dar algún tipo de solución a los mismos, apoyando el cuidado al medio ambiente y recursos naturales.

Los plásticos se enfrentan a uno de los retos más importantes desde su introducción al mercado, ya que sus ventajas como resistencia a la degradación y su economía con respecto a otros materiales están siendo cuestionadas por su impacto ambiental. Algunos países han creado medidas legislativas como la retornabilidad y la reglamentación en el uso de materiales para reciclado. El interés por reciclar plásticos tiene como beneficios el mejoramiento ecológico y la generación de nuevas industrias que puedan resolver los problemas de contaminación, aunado a la obtención de utilidades económicas.

En el año de 1970, inicia el desarrollo del reciclado de plásticos, debido a que su precio comenzó a incrementarse y, posteriormente, al desabasto de materiales como consecuencia del embargo petrolero y del aumento en el precio del petróleo.

Con el objeto de encontrar soluciones para los desechos plásticos, se han desarrollado diversas investigaciones que incluyen métodos físicos y químicos. Los métodos físicos consisten en sistemas para lavado y separación, molienda, fusión y granulado. Los métodos químicos no han prosperado fuera del laboratorio, como el proceso de pirólisis para aprovechar el poder calorífico de los materiales plásticos, o los procesos de hidrólisis que sirven para depolimerizar las moléculas de los plásticos, como el PET y el acrílico, y así obtener sus materias primas originales.

En 1980, el reciclado de plásticos por medios físicos adquiere gran importancia; en 1990 se desarrollaron centros de acopio, en donde se recolectan sistemáticamente los diferentes materiales susceptibles de reciclado (metal, papel, vidrio, plástico entre otros), para facilitar su transformación posterior. Así, los desperdicios plásticos se vuelven a integrar a un ciclo, industrial o comercial, convirtiéndose en materias primas a través de procesos cada vez más especializados. Japón va a la vanguardia, pues vuelve a usar la mitad de la basura generada, recicla más de 50% de papel y vidrio y cerca de 70% de la orgánica.

Cabe señalar, que casi el 95% de los plásticos son reciclables. El reciclamiento de plásticos en México no se había iniciado debido a que no se podían aprovechar en forma efectiva, pues los desechos tenían que llegar a la industria sin ningún tipo de material extraño como grapas, cinta adhesiva, papel, etc. Sin embargo, en la actualidad existen algunos centros de reciclamiento de plástico tanto limpio como sucio.

Por otra parte, la basura siempre ha sido un problema para la sociedad y el medio ambiente. Basura es todo objeto que ya no tiene uso o valor, y provoca el deseo de eliminarlo. En 1993, se produjeron 1,000 millones de toneladas de basura en el mundo, representan 2.7 millones de toneladas diarias, y si se considera que tienen una densidad de 200 kg/m^3 , equivalen a 13 millones de m^3 . De este volumen, sólo el 30% recibió tratamiento, el resto se convirtió en un problema ecológico, higiénico, social y económico, ya que el costo de su recolección, transporte y eliminación es cada vez más elevado y cuestionable. México es uno de los países con mayor producción de basura, en 1994 llegó a 29 millones de toneladas.

El plástico es uno de los materiales que más daño causan al ambiente, ya que es muy difícil de degradar. En México, consumimos cerca de 200,000 botellas de plástico cada hora. Los envases desechables y empaques no retornables tardan más de diez años para desintegrarse y al hacerlo contaminan el subsuelo. Por otro lado, la gran mayoría de los plásticos tardarán decenas de años en ser desechados como residuos; refiriéndonos concretamente a materiales plásticos usados en la construcción, industria del automóvil o electrónica, los cuales forman parte de los llamados bienes duraderos y su presencia en los residuos urbanos es esporádica e impredecible.

De nuestras casas es de donde sale la mayor cantidad (60%) de los materiales plásticos, los comercios contribuyen con un 10% de los desperdicios plásticos totales en la Zona Metropolitana, la industria de alimentos, la de cosméticos y la de productos de limpieza generan otro 10%, la industria transformadora colabora con un 15% y el restante 5% se genera cuando se extrae la materia prima.

El plástico, al igual que otros materiales (papel y metal), genera desperdicios desde la obtención de la materia prima, su producción, hasta su consumo final. Estudios realizados sobre el particular demuestran que en los residuos sólidos urbanos sólo encontraremos una gran parte de los plásticos utilizados en la fabricación de envases y embalajes, juguetes y otros artículos de consumo, esto es lógico ya que son productos de aplicación predominantemente de corto a mediano plazo. Por el contrario, la procedencia de los residuos plásticos industriales es muy heterogénea y responde más a las técnicas de producción de los materiales plásticos que a su aplicación.

Es importante resaltar la necesidad de crear una consciencia de reciclamiento en los ciudadanos, de manera que cada uno colabore para mejorar el ambiente que nos rodea. A continuación, se enlistan algunas razones que justifican la palabra RECICLAR.

RECICLAR significa la circulación de materiales dentro de un sistema cerrado, con el propósito de optimizar recursos, disminuir la generación de basura, propiciar la separación de desperdicios y reintroducir los mismos al sistema productivo para generar artículos útiles al hombre.

- **Económicas:** Los condicionamientos económicos generales de la industria de plásticos, (en la que los costos de las materias primas son una parte muy significativa del precio del artículo fabricado), han hecho que el reciclado sea siempre un poderoso incentivo. Ello se ha traducido en el reprocesado de los residuos plásticos industriales en la misma planta o de los que son comprados a firmas especializadas en el reacondicionamiento y mejora de residuos plásticos. A medida que aumenten los precios de los materiales vírgenes, aumenta el interés de este tipo de recuperación y la cantidad de residuos tratados.

- **Razones de ahorro de materias primas y energía:** En un trabajo publicado por Imperial Chemical Industries (Reino Unido), se ha estimado que la energía total consumida en la fabricación de los principales polímeros está entre 1.7 y 2.5 t.e.p. por tonelada de polímero. En cada cifra está incluido no sólo el petróleo que se usa como materia prima, sino también el petróleo que se necesita para producir la energía total consumida durante el proceso de producción del polímero.

Dentro de las razones energéticas que justifiquen el reciclado de los residuos plásticos, habría que considerar también su uso como fuente de energía, o sea, como una alternativa al petróleo del que fueran obtenidos. Esta operación se conseguiría mediante un reciclado terciario como incineración, pirólisis, etc.

- **Razones de tipo ecológico:** Actualmente, ante la crisis energética, se presenta el reto que involucra a la tecnología de vanguardia y a la naturaleza, para prevenir el agotamiento de los recursos no renovables como los hidrocarburos entre otros. No obstante, se debe reconocer que falta mucha exploración y contabilización de dichos recursos a nivel mundial. El reciclado de plásticos contribuye con la ecología, al ahorrar hasta el 88% de la energía que se requiere para producirlos a partir de petroquímicos y, conserva los recursos naturales al reutilizar los productos del petróleo.

Finalmente, se incluye en la figura 1.22 una secuencia de acciones para disminuir el problema que generan los materiales de corta vida útil.



Figura 1.22 Secuencia de acciones por importancia

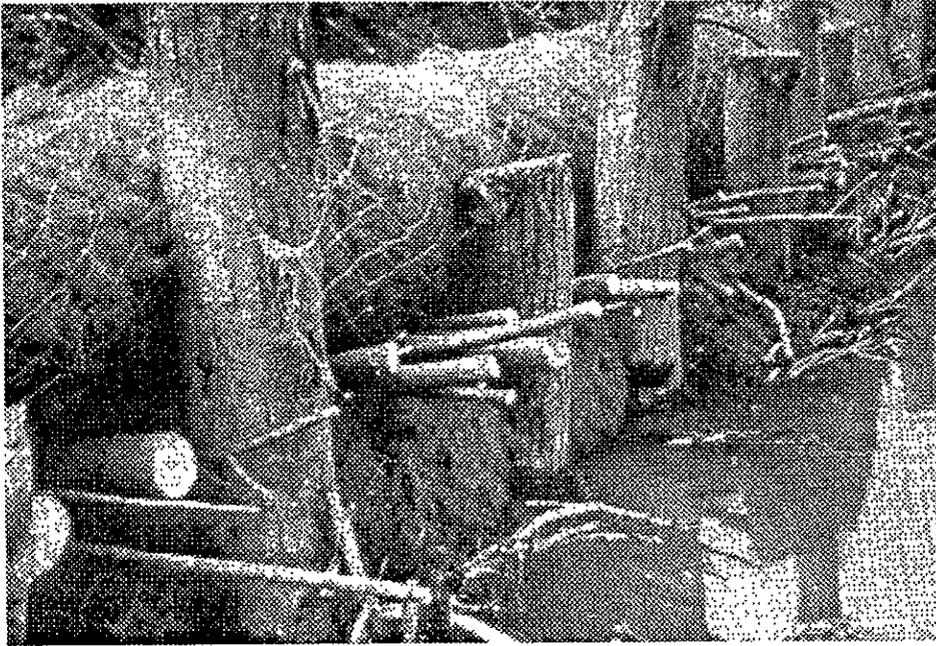
REDUCIR: Utilizar la menor cantidad posible de materiales que se vayan a desechar.

REUTILIZAR: Aprovechar al máximo la vida útil de los productos a través de sistemas de retornabilidad.

RECICLAR: Es la tercera opción y se aplica una vez que los productos ya no pueden ser utilizados para su objetivo original. Sirve para obtener materia prima que será utilizada en la fabricación de artículos útiles para una segunda aplicación.

RECUPERAR: Utilización de métodos químicos para obtener materias primas o energía a partir de desechos plásticos.

BASURA: Artículos que ya han alcanzado su máximo uso y no se justifica su reciclamiento.



2. ASPECTOS GENERALES DE LOS GEOSINTÉTICOS

2. ASPECTOS GENERALES DE LOS GEOSINTÉTICOS

2.1 Antecedentes

En el capítulo anterior, se habló de los polímeros y plásticos cuyo impacto en la industria y sociedad han sido muy significativos, pues han desplazado a otros materiales por su costo-beneficio. Desde la segunda guerra mundial hasta hoy, los plásticos y todas sus formas han influido en los conceptos de material y diseño en la construcción. Algunos ejemplos son las nuevas pinturas, adhesivos y compuestos de calafateo; nuevos materiales para pisos, muros, divisiones y techados; nuevos repelentes del agua, acabados para muros de tipo duro y de alto brillo, acabados para piso que son aplicados como pintura, y laminados. En el campo de la electricidad existen recubrimientos plásticos para alambre, cajas para interruptores y placas para éstos, para plomería y calefacción existen tubos, ductos de plástico, etc. La creación de ventanas y puertas de plástico de todo tipo con amplia gama de colores, ha generado una nueva serie de productos que tienen mejores cualidades herméticas contra intemperie, más aislamiento y ciertas características de ventilación completamente diferentes.

El empleo de plásticos en morteros, cementos y concretos ha mejorado las propiedades de estos materiales, como la resistencia a la tensión y ha creado usos novedosos para productos de mampostería y concreto. El uso de fibras sintéticas con resistencias tensiles superiores a $1,379 \text{ MN/m}^2$ ($200\,000 \text{ lb}_f/\text{in}^2$) y otras fibras naturales en el concreto, ha creado un nuevo material estructural llamado concreto fibroso o polimerizado, dando lugar a nuevos tipos de concreto reforzado y diseños estructurales vanguardistas y caprichosos.

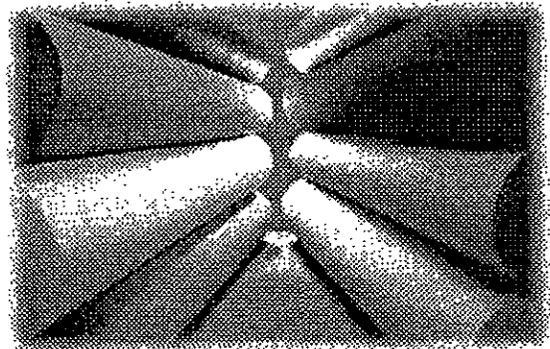


Figura 2.1 Rollos de diferentes geosintéticos

Por otra parte, desde la antigüedad el hombre ha utilizado los materiales que ha tenido a su alcance para mejorar sus técnicas constructivas. Se habla del uso de pieles de animales o fibras vegetales sobre suelos muy blandos para reforzarlos, al mejorar las propiedades mecánicas del suelo y evitar la incrustación de materiales gruesos en la construcción de caminos, bordos, chinampas, etc. Este concepto es antiguo, hace 3 000 años los babilonios utilizaron ramas entrelazadas de palmera para reforzar su "ziggurat". La gran muralla china construida hace más de 2 000 años, contiene algunas secciones donde la arcilla y la arena fueron reforzadas con ramas. En 1822, el Coronel Pasley introdujo a la armada británica una forma de refuerzo de suelos, demostrando por medio de pruebas que la presión lateral en un muro de contención podía reducirse si el relleno era reforzado con capas horizontales de maleza, madera o lona.

El empleo de telas para reforzar el suelo se inicia en este siglo en la década de los años 60, fabricándose los primeros textiles específicamente para obras ingenieriles a principios de los años 70, así se adoptan los términos de geotextil y geomembrana como denominación de materiales elaborados con POLÍMEROS que se emplean en geotecnia. En esta década, los geotextiles son usados para reforzar muros de contención, laderas pronunciadas y dramáticas construcciones hechas por cuerpos de ingenieros en suelos tan blandos que ni siquiera un hombre podría caminar en ellos.

El concepto de filtración y su desarrollo histórico es un antecedente importante que explica el hallazgo de bancos de grava naturales "bien graduados", los cuales se han usado como materiales de filtro desde hace muchísimo tiempo. La depuración de las aguas, haciéndolas pasar a través de filtros de grava o de suelo, parece ser un método obsoleto, aunque todavía se usa.

La idea de sistematizar el proceso se le atribuye a Terzaghi y a Casagrande en los años 30's y fue retomado poco después por Bertram en 1940. El concepto de los filtros de suelo ha sido llevado con éxito en la aplicación de los geotextiles, ahora con mayores beneficios de costo, control de calidad y eficiencia.

Por otro lado, se han formado barreras impermeables que sirven para contener lixiviados y evitar su migración. Estas membranas han sido fabricadas utilizando suelos poco permeables de tipo arcilloso. Los acueductos romanos fueron impermeabilizados de manera semejante y su tecnología prevaleció por muchísimos años. Las membranas hechas de productos de asfalto y otros cementantes se han usado desde 1900, pero el material de hule sintético comenzó a utilizarse a partir de 1940, en que se empezaron a producir los polímeros. En la actualidad, esos materiales tipo membrana son obligatorios de acuerdo a las normas de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en los Estados Unidos de América y de la SEDESOL en México.



Figura 2.2 Colocación de un geosintético

La tecnología del uso de las materias plásticas asume un aspecto cada día más sofisticado y la aplicación de materiales con base polimérica en la ingeniería civil, la geotecnia y la ecología está en constante expansión. Así surgen los **geosintéticos**, término empleado para definir una amplia variedad de productos plásticos usados en ingeniería y arquitectura, como una alternativa o complemento a los materiales tradicionalmente usados. Son tan variados estos productos, tan diversas sus aplicaciones y ha sido tan acelerada su evolución, que da la impresión de que no se ha dispuesto del tiempo suficiente para evaluar más eficientemente el comportamiento de estos materiales.

Desde 1971, se ha incrementado rápidamente el interés y el número de publicaciones referentes al uso de geosintéticos que han revolucionado muchos aspectos de la construcción de las obras ingenieriles en tan corto tiempo. Por ejemplo, la Administración Federal de Carreteras del estado de Oregon, EUA, publicó un reglamento para el empleo de geotextiles, realizado por Bell y Hicks de la Universidad Estatal de Oregon. En 1977, un evento relevante de la Escuela Nacional de Puentes y Caminos de Francia que organizó el "Primer Congreso Internacional sobre el uso de membranas en geotecnia", el cual aportó un total de 66 artículos. Se sabe que en los últimos años se han celebrado reuniones internacionales al respecto en lugares como París, Las Vegas, Viena y recientemente en La Haya, Holanda. En México han habido algunas reuniones en ambiente reducido o de limitada proyección.

En esa misma década de los 70's se comienzan a crear los estándares de desarrollo con la formación de ASTM D13-18 unido al Comité de Geosintéticos y con la formación de un destacamento industrial como AASHTO-AGC-ARTBA. Los geosintéticos toman un rol crítico en los 80's, fecha en que probarían ser el proyecto más importante del hombre: la recuperación de terrenos inservibles y el seguro contenedor de los residuos peligrosos.

En este siglo existe la necesidad de establecer una industria consistente que proporcione los lineamientos y especificaciones de los geosintéticos y los productos relacionados. Mientras estén atentas aplicaciones desconocidas y el refinamiento de los usos actuales de los geosintéticos, será un reto para los fabricantes y la comunidad académica el establecimiento de dichos lineamientos y beneficios de la ingeniería aplicada utilizando los métodos de diseño actuales. Se espera que los avances en la materia y en los nuevos métodos de diseño incrementen la confianza de los ingenieros en la aplicación cada vez más frecuente de los geosintéticos, y sean un estímulo para las futuras generaciones de ingenieros invitándolas a explorar nuevas aplicaciones en las próximas décadas.

2.2 Geosintéticos

El término geosintéticos es el nombre genérico de cualquier producto elaborado con polímeros (sintéticos o naturales) para su uso en contacto con el suelo, roca y/o cualquier otro material geotécnico como parte integral de un proyecto, estructura o sistema de ingeniería. Involucra a los siguientes productos: geotextiles, geomembranas, georredes, geomallas, geodrenes, geoceldas, geocompuestos y productos relacionados.

Los polímeros principales que se usan como materiales geosintéticos son la olefina, polipropileno, poliéster, polietileno, poliamida, PVC, etc. Estos materiales presentan alta resistencia a la degradación biológica y química.

Olefina: Se obtiene a partir de cualquier polímero sintético de cadena larga que contenga, por lo menos un 85% en peso de etileno, propileno y otras unidades de olefinas. Estas unidades son inertes químicamente, peso liviano, fuertes y ofrecen alta resistencia a la abrasión. El polipropileno, polímero olefínico, se usa ampliamente en la fabricación de geosintéticos. Al incrementar la linearidad de la estructura del polímero, se incrementa la resistencia y la densidad del mismo.

Poliéster: Se obtiene a partir de cualquier polímero sintético de cadena larga que contenga, por lo menos un 85% en peso de un éster del alcohol dihidrico y ácido tereftálico. En telas geotextiles, las fibras de poliéster aportan una resistencia alta, hacen que la tela sea inerte químicamente y con alta resistencia a la abrasión. La resistencia a la fluencia tan alta del poliéster resulta útil en instalaciones que requieren una exposición a esfuerzos por largo tiempo. Tanto los materiales de poliéster como los de poliolefina retienen su resistencia seca original después de humedecerse.

Otros polímeros: El nylon y el poliestireno se usan también en la fabricación de geocompuestos. El nylon es una poliamida de cadena larga, se usa algunas veces para las fundas de cabecera en la estabilización de terraplenes. El poliestireno se usa en estructuras amplias de espuma para soportar otros geotextiles, donde se necesite un material muy liviano y resistencia a la compresión por mucho tiempo.

En la fabricación de geosintéticos pueden utilizarse otros materiales como el caucho o goma, la fibra de vidrio y materiales naturales (en menor proporción).

Los geosintéticos son manufacturados en forma de lienzo, tira o panel; y están disponibles en una variedad de geometrías y composición de polímeros capaces de satisfacer un amplio rango de aplicaciones. Es importante que todos los materiales que constituyen los geosintéticos sean resistentes, durables, inertes químicamente y que sean altamente resistentes a los efectos de las condiciones del terreno, clima y paso del tiempo.

En instalaciones permanentes, el comportamiento a largo plazo de la estructura depende de la durabilidad del geosintético. De acuerdo a la aplicación, los geosintéticos podrían tener requerimientos específicos como son resistencia a la fluencia, a la temperatura o su exposición a la luz ultravioleta. Todos los factores pertinentes deben considerarse al hacer la selección del o los geosintéticos a utilizar.

Los geosintéticos constituyen la más novedosa manifestación de la ingeniería de materiales, ya que en poco tiempo se han convertido en un elemento auxiliar de gran importancia en el desarrollo de obras de infraestructura. Las razones para esta explosión de nuevos productos son numerosas e incluyen las siguientes:

- Son elaborados bajo estricto control de calidad en fábricas ambientales.
- Se manejan e instalan fácil y rápidamente. No requieren equipo especializado.
- Son versátiles, flexibles, resistentes y se adaptan a las irregularidades de las superficies y condiciones donde se colocan.
- Reemplazan generalmente a materiales tradicionales (gravas, arenas,...).
- Su duración o vida útil esperada sobrepasa los 100 años.
- Generalmente reemplazan diseños complicados con materiales naturales.
- Su uso es requerido por ley en algunos casos.
- Generalmente su costo es competitivo sobre suelos naturales a los cuales reemplazan.
- Hoy en día se comercializan activamente y están disponibles fácilmente.

Como se mencionó, los geosintéticos son derivados de hidrocarburos que adquieren diversas formas. Su mayor aplicación se encuentra en la ingeniería geotécnica, la construcción y la ingeniería ambiental. Son de la mayor utilidad para el mejoramiento de suelos y para el control de la contaminación en la disposición de desechos sólidos y líquidos. Sus funciones son múltiples, y en general, en una obra de ingeniería, estos materiales tienen una función principal como separar, reforzar, filtrar, drenar, control de erosión, aislar o impermeabilizar, y otras secundarias como: evitar contaminación, redistribuir esfuerzos, reforzamiento de tierra, filtración, drenaje, control de la permeabilidad, entre otras. Sirven Su instalación es fácil, permiten reemplazar materiales naturales y en general presentan buena durabilidad y uniformidad.

Con frecuencia, el uso de un geosintético puede aumentar en forma significativa el factor de seguridad, mejorar el comportamiento y reducir los costos en comparación con las alternativas de construcción convencionales. En el caso de terraplenes sobre suelos demasiado blandos, los geosintéticos pueden permitir que tenga lugar la construcción en sitios donde las alternativas convencionales la harían imposible o de un costo prohibitivo. Se dice que se han identificado más de 150 aplicaciones separadas de los geosintéticos (Koerner 1990).

En la actualidad, existen pocas cosas que se hayan desarrollado con un crecimiento tan rápido y una influencia tan fuerte en tantos aspectos de la aplicación de la ingeniería civil como los geosintéticos. Como ejemplo, en 1970 había apenas 5 ó 6 tipos de geotextil disponibles, mientras que a principios de los 90's se vendían más de 250 materiales diferentes en los Estados Unidos.

Las metodologías de diversas áreas se combinan para estudiar el comportamiento conjunto de los geosintéticos y de los suelos. Día a día, es más necesario que especialistas en mecánica de suelos, químicos, biólogos, agrónomos, ingenieros textiles y expertos en sofisticadas técnicas de medición, laboren interdisciplinariamente, para comprender mejor la interrelación entre materiales plásticos y naturales, y así elaborar nuevos productos, teorías de diseño, pruebas de control y metodologías de aplicación, lo cual es imprescindible debido al aumento de uso de productos sintéticos en obras de ingeniería.

Cabe señalar, el esfuerzo realizado por geotecnistas y químicos en polímeros, quienes se han dedicado a estudiar estas innovaciones tecnológicas, lo que ha dado lugar a nuevos especialistas en geosintéticos. A continuación se describen los geosintéticos más comunes.

2.3 Descripción breve de los productos geosintéticos

Geotextiles (geotextile)

En el IV Congreso Internacional de Geotextiles, Geomembranas y Productos Relacionados, celebrado en la Haya, Holanda en 1990, se propuso la siguiente definición: Los geotextiles son materiales de construcción flexibles y permeables a los fluidos, capaces de retener partículas de suelo mayores que el tamaño de sus poros, que han sido diseñados y fabricados para diversas obras de ingeniería civil.

La definición de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM) es: Producto textil permeable hecho de polímero (natural o sintético) en forma de lienzo, que es utilizado en combinación con la cimentación, suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre.

Los geotextiles forman el grupo más amplio dentro de los geosintéticos. Su crecimiento y aceptación han sido muy grandes en los últimos 20 años, aún cuando son textiles en el sentido tradicional de la palabra, pero fabricados de fibras sintéticas en lugar de los típicos algodón, lana o seda. Esto evita la biodegradación, ya que son elaborados de fibras sintéticas porosas, tejidas, no tejidas o punzonadas. Al ser porosos permiten una fácil circulación del agua a través de ellos y a lo largo de sí mismos, pero con diferentes permeabilidades.

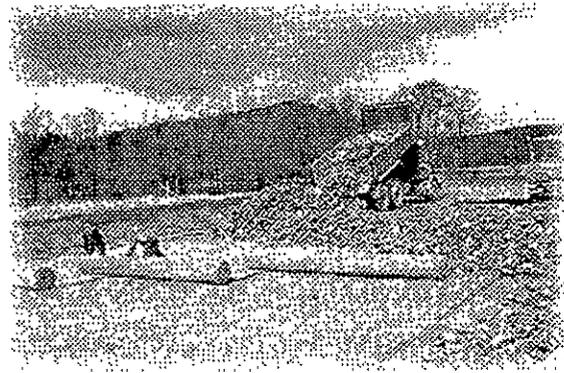


Figura 2.3 Colocación de un geotextil no tejido

Existen al menos 80 aplicaciones específicas para las cuales son aplicables los geotextiles, sin embargo, la fibra solamente trabajará en una de las seis funciones siguientes:

- Separación
- Refuerzo
- Filtración
- Drenaje
- Impermeabilización (cuando se impregna con asfalto)
- Protección (generalmente a geomembranas)

Su principal enemigo pueden ser los rayos ultravioletas del sol, por lo que en algunos casos se les agrega una sustancia protectora llamada negro de humo, la cual absorbe parte de la radiación y prolonga la vida del geotextil, pero no los vuelve inmunes a ella.

Ciertas fibras naturales como el algodón, el yute o fique, bambú, etc. se pueden utilizar como geotextiles y geomallas, en especial para aplicaciones temporales, pero éstos no han sido promovidos o investigados en forma tan amplia como los geotextiles hechos a base de materiales poliméricos sintéticos. Además, hasta el momento no existe una definición oficial por parte de la ASTM para estos materiales.

Se dice que son "relacionados con los geotextiles" debido a que se utilizan de forma similar, en especial en situaciones de refuerzo y estabilización. En el capítulo 3, se tratará el tema de geotextiles en forma más amplia.

Geomembranas (geomembrane)

Una definición formal de geomembrana es: estructura planar polimérica (sintética o natural), esencialmente impermeable, manufacturado en forma de lienzo, usado en contacto con suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre.

Otra definición de geomembrana es aquella que la define como: Revestimientos y barreras del tipo de membrana continua, a partir de materiales asfálticos, poliméricos, o una combinación de éstos, con o sin refuerzo interno, con permeabilidad lo suficientemente baja ($k < 10^{-11}$ cm/s) como para controlar la migración de fluidos en un proyecto, estructura o sistema artificial relacionado con la ingeniería geotécnica.

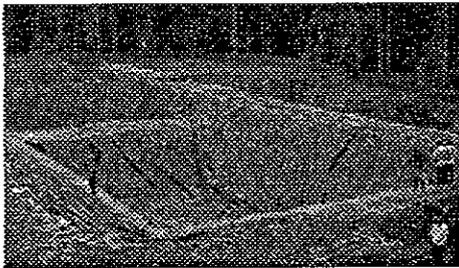


Figura 2.4 Revestimiento de geomembrana

Las geomembranas son recubrimientos sintéticos de espesor reducido, impermeables a fluidos y partículas, que se utilizan en ingeniería geotécnica, ambiental, hidráulica y de transporte; generalmente elaboradas con cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) entre otros. Además, constituyen el segundo grupo en tamaño de los geosintéticos.

Su crecimiento va directamente ligado a las normas establecidas por la EPA, en relación con la protección al medio ambiente. Son materiales muy delgados, impermeables, en forma de sábanas de hule o de plástico, utilizadas principalmente para cubrir instalaciones que contengan líquidos o sólidos.

Sus usos más comunes son: impermeabilización de bordos, ollas de agua, canales de riego, cisternas, piscinas, azoteas y techos, revestimiento de depósitos de agua (lagos, presas, estanques, embalses artificiales, etc.), fosas de biorremediación, lagunas de oxidación, revestimiento de *liners* y cubiertas de rellenos sanitarios, revestimiento de canales de irrigación y conducción de líquidos, revestimiento de sistemas de diques de contención de derrames de líquidos contaminantes, sellado de grietas en presas y tubos, entre otros.

Su rango de aplicación es muy grande, tienen al menos 30 aplicaciones diferentes, por sí mismas. Esto ha provocado que se desarrolle tecnología para crear geomembranas de acuerdo a su aplicación. En el capítulo 4, se tratará el tema de geomembranas de manera más amplia.

Geomalla (geogrid)

La geomalla se define como una estructura planar polimérica, unidireccional o bidireccional, manufacturada en forma de lienzo; consiste en un sistema de elementos conectados integralmente, por medio de extrusión, amarres o entrelazados, cuyas aberturas son más grandes que los elementos que la forman. Se utiliza en contacto con el suelo, roca o cualquier otro material geotécnico en diversas aplicaciones de ingeniería civil (geotecnia, ambiental, hidráulica y transporte).

Existen diversos tipos de geomallas, entre los que se distinguen:

Geomalla mono-orientada: geomalla que posee más capacidad de soportar los esfuerzos de tensión en una dirección que en la otra, ya sea longitudinal o transversalmente. Son estructuras bidimensionales producidas de polietileno de alta densidad (HDPE), utilizando un proceso de extrusión seguido de un estiramiento mono-direccional.

Este proceso único permite obtener una estructura monolítica con una distribución uniforme de largas aberturas elípticas, que proporcionan gran fuerza de tensión y gran módulo de tensión en la dirección longitudinal.

Este tipo de estructura provee de un sistema de trabazón óptimo en el suelo.

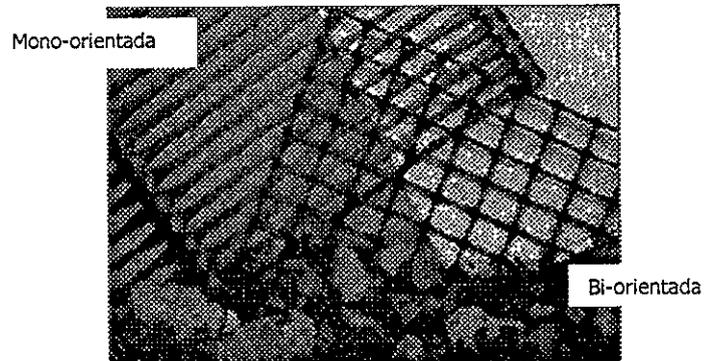
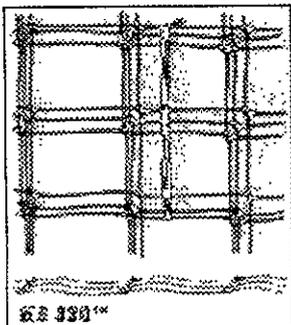


Figura 2.5 Diferentes geomallas



Geomalla bi-orientada: geomalla que posee la misma capacidad de soportar esfuerzos de tensión en ambas direcciones, longitudinal y transversal.

Son estructuras bidimensionales fabricadas de polipropileno, químicamente inertes, con características uniformes y homogéneas, producidas mediante extrusión y luego estiradas longitudinal y transversalmente.

Las geomallas bi-orientadas pueden usarse para reforzar taludes pequeños y como refuerzo secundario, complementando el refuerzo primario proporcionado por las geomallas mono-orientadas.

Geomalla extruída: geomalla producida mediante estiramiento uniaxial (aberturas en forma de elipse) o biaxial (aberturas en forma cuadrada o rectangular), extruída de forma integral.

Geomalla anudada: geomalla producida mediante amarres generalmente en ángulos rectos, de dos o más juegos de hebras u otros elementos.

Geomalla tejida: geomalla producida mediante el entrelazado de dos o más filamentos u otros elementos, que forman generalmente ángulos rectos.

El hombre siempre ha tratado de utilizar taludes, orillas de las costas, acantilados y otros sitios que son considerados valiosos por su estética o por su localización geográfica, pero donde la construcción es difícil. Por lo tanto, a través del tiempo, el hombre ha desarrollado el concepto de suelo reforzado, de forma que mejoren las propiedades mecánicas del mismo.

Las geomallas están diseñadas específicamente para refuerzo de suelos, proveen características controladas, comportamiento uniforme, variabilidad limitada y gran durabilidad.

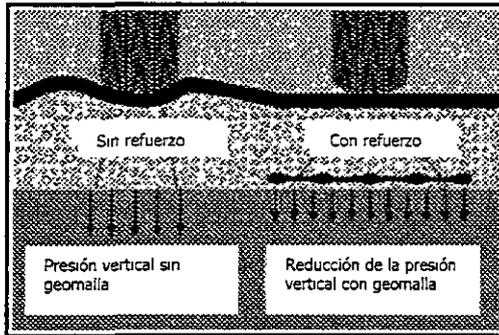


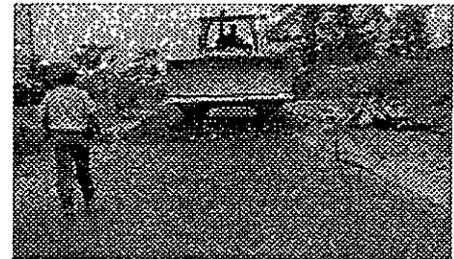
Figura 2.7 Efectos de la presión vertical al utilizar o no geomalla

Las partículas de suelo o conglomerado se encastran en las aberturas de la geomalla, que trabaja así como zuncho, limitando los movimientos relativos y mejorando la resistencia al corte. Una carga normal al plano de la geomalla compacta las partículas y produce un engranamiento contra una cara y la otra de la geomalla, esforzándola a la tensión.

Así, la estructura terreno-geomalla se comporta como si tuviese una resistencia a la tensión intrínseca, es decir, la colocación de la geomalla en el terreno produce una especie de cohesión en materiales no cohesivos naturalmente. La estructura terreno-geomalla combina la elevada resistencia a la compresión de los gránulos, con la elevada resistencia a la tensión de la geomalla, creando así un material con mayor rigidez y estabilidad que el agregado puro. La capacidad de la geomalla de recibir los esfuerzos y de redistribuirlos en un plano, contribuye posteriormente al mejoramiento de las características de resistencia a las cargas estáticas y dinámicas.



Figuras 2.8 y 2.9 Refuerzo de suelo con geomalla



Las geomallas permiten la construcción de taludes con pendientes pronunciadas, casi verticales; y muros de suelo reforzado de manera más confiable, rápida, segura y económica que con los materiales utilizados en el pasado.

Tienen aplicaciones en obras tales como cuerpos de terraplén en caminos o ampliaciones de los mismos, rampas de acceso a puentes con taludes completamente verticales, construcción de terrazas residenciales en laderas, y en toda obra donde se requiera obtener un talud con pendientes mayores a las que permite el ángulo de reposo natural del material in situ.

Otras aplicaciones de las geomallas son: muros de contención, reparación de deslaves, reparación de cortes en taludes, ampliación de cresta de taludes, muros vegetados y recubiertos con concreto, terraplenes para caminos y vías férreas.

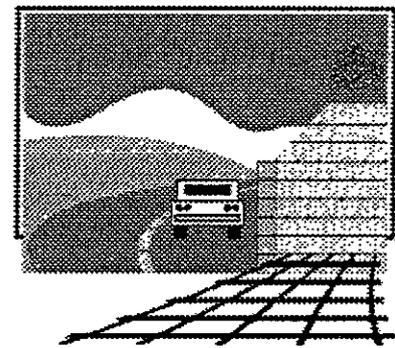


Figura 2.10 Estabilización y refuerzo de talud

Las geomallas constituyen una solución innovadora y ventajosa desde el punto de vista técnico y económico, entre lo que destaca:

- La posibilidad de construir carreteras sobre terrenos normalmente no transitables por vehículos pesados.
- La posibilidad de reducir el impacto ambiental de las obras de sostenimiento.

- Aumento en la vida útil de obras sometidas a fuerzas concentradas y a las rápidas variaciones de carga.
- Fácil colocación, aún en condiciones ambientales difíciles.
- Reducción en el tiempo de ejecución de la obra.

Georred (geonet, algunas veces llamada geospacers)

La georred es una estructura planar polimérica, manufacturada en forma de lienzo, que consiste en un sistema regular de costillas sobrepuestas conectadas integralmente, cuyas aberturas son generalmente más grandes que los elementos que la forman; se utilizan en aplicaciones de ingeniería civil (geotecnia, ambiental, hidráulica y transporte).

La EPA (Environmental Protection Agency), agencia federal estadounidense encargada de la protección al ambiente, definió en 1984 normas precisas que favorecen el empleo de georredes y de otros geosintéticos para la realización de rellenos sanitarios.

Las georredes son estructuras reticulares de malla, formada por series de hilos o filamentos sobrepuestos y entrelazados, que forman canales con una capacidad elevada de drenaje.

Son completamente elaboradas con polietileno de alta densidad (HDPE) y pueden ser incorporadas a uno o dos geotextiles filtrantes o a una cubierta impermeable, formando así un geocompuesto.

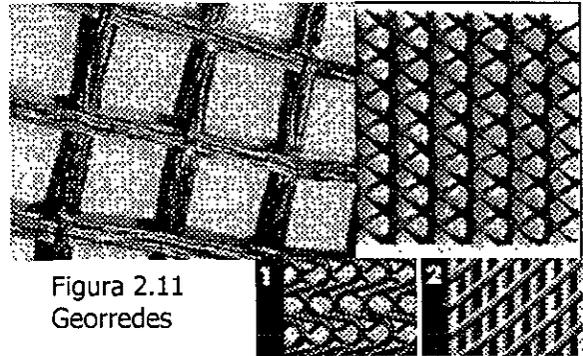


Figura 2.11
Georredes

Además de las ventajas ofrecidas por el material del que están manufacturadas (HDPE, que presenta una excelente resistencia a una amplia variedad de agentes químicos, durabilidad, buena resistencia a la tensión, presión, calor y a las variaciones de temperatura), la estructura de dos o tres series de hilos le permite la conducción de líquidos y gases en cualquier dirección y con mínima pendiente. Los canales formados por los hilos permiten el movimiento de un fluido a lo largo de toda la red, lo que permite el paso de grandes caudales aún con espesor limitado.

Debido a su elevada capacidad drenante y a su gran resistencia a la presión, las georredes y los geocompuestos pueden reemplazar a los tradicionales estratos de arena y grava, permitiendo notables ahorros sobre el costo de almacenamiento y colocación de los materiales.

Las georredes ofrecen varias ventajas:

- Menor costo de adquisición y colocación, respecto a materiales drenantes tradicionales.
- Mayor estabilidad de los paramentos.
- Resistencia a la erosión y corrosión.
- Posibilidad de realizar paredes más verticales y de reducir el espesor del estrato drenante, y así obtener una mayor capacidad útil.
- Mayor facilidad en la colocación, aún en climas adversos.
- Posibilidad de sustituir a los materiales inertes no localizados en el lugar de la obra.
- Notables valores de transmisibilidad hidráulica, incluso sometido a presiones elevadas.

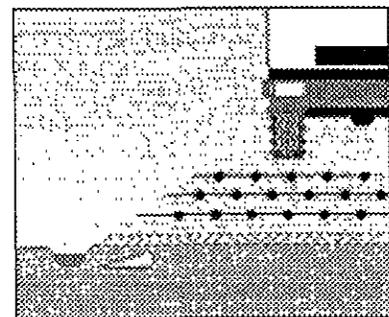


Figura 2.12 Drenaje del camino
con georred

Dentro de las funciones principales de las georredes destaca: la distribución de cargas, regularización del lugar, protección mecánica de las geomembranas en contacto con desechos, drenaje de líquidos y gases presentes en el suelo bajo las geomembranas, drenaje de las pérdidas accidentales de la impermeabilización primaria (cuando se usa la técnica de doble impermeabilización), drenaje de filtrados y de las aguas encima de la impermeabilización primaria.



Figura 2.13 Georred colocada en talud

Es importante remarcar que, para desarrollar una adecuada función drenante, las georredes no deben colocarse directamente en contacto con el suelo o los desechos, sino juntas con geotextiles o geomembranas, de manera que las partículas finas de los materiales adyacentes no obstruyan los canales drenantes de la georred.

La selección del geotextil o geomembrana dependerá de las características específicas y condiciones de proyecto.

Por lo tanto, el uso de georredes se justifica en cualquier obra de ingeniería, donde sea primordial el tener un manejo hidráulico adecuado para evitar problemas posteriores en la misma. Por ejemplo, en terrapienes donde el enemigo principal es el agua, la cual destruye el cuerpo del terraplén, socavándolo y llevándose el material fino; en muros de contención tradicionales donde es importante desalojar el agua rápidamente para evitar sobrepresiones sobre la cara del muro, ya que su función es retener suelo y no presión hidrostática; en rellenos sanitarios para recolección de lixiviados y gases, entre otros.

Geoceldas (geocell)

La geocelda es una estructura tridimensional polimérica (sintética o natural), permeable, en forma celular, similar a un panal de espesor variable, manufacturado con tiras de geotextiles, geomembranas o geomallas, conectadas por medio de extrusión o adhesión u otros métodos, que se usa en contacto con el suelo, roca o cualquier otro material geotécnico en aplicaciones de ingeniería civil (geotecnia, ambiental, hidráulica y transporte).

Existen unas geoceldas realizadas en polietileno mediante un sistema único de extrusión continuo, que no requiere de ningún tipo de unión o soldadura adicional, formando una estructura monolítica muy resistente a la tensión, se puede expandir o comprimir como acordeón formando así una serie de celdas hexagonales unidas todas entre sí, lo cual permite su fácil transportación y almacenamiento de manera compacta.

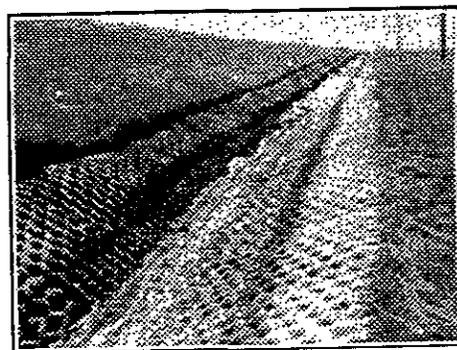


Figura 2.14 Geoceldas colocada sobre pendiente

Las geoceldas permiten conservar el material introducido en cada una de las celdas, impiden el movimiento incluso en pendientes muy inclinadas o durante fuerzas de tensión como las producidas por una corriente hidráulica.

Una vez desplegada y colocada, se vuelve un sistema estable con efectivo confinamiento del material suelto colocado en cada celda. Este confinamiento se vuelve muy resistente a la distribución de cargas y a la acción de las cargas puntuales; por lo que puede usarse para incrementar la capacidad de carga del suelo.

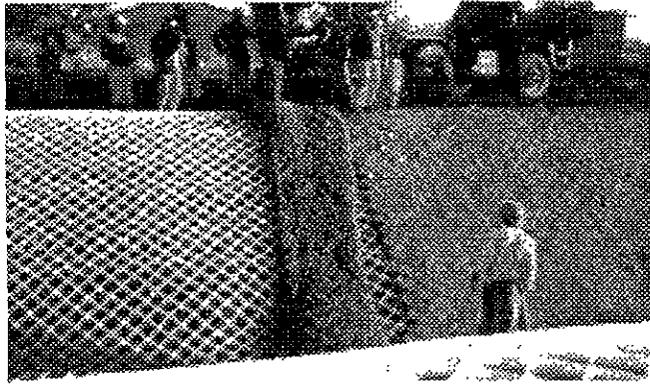


Figura 2.15 Colocación de pasto sobre geoceldas

Hay geoceldas cuyas juntas poseen una abertura central a través de la cual puede pasar el agua, de forma que las celdas están ligadas hidráulicamente entre sí, y al estar en contacto con el suelo permite los movimientos de filtración entre las diversas celdas, lo cual ofrece una buena permeabilidad que facilita la absorción de agua durante las precipitaciones y disminuye el flujo superficial, así como la erosión.

Algunas aplicaciones de geoceldas son: control de la erosión sobre pendientes, elevaciones, riberas, flujos de agua y lagos; realización de orillas en pequeñas corrientes y lagos; estabilización de base en carreteras, pasos peatonales, senderos, parques; cruce de corrientes de agua de pequeña profundidad.

Entre las ventajas principales de las geoceldas se tienen:

- Reducción de su volumen durante el transporte y almacenaje.
- Facilidad y rapidez de colocación en obra.
- Posibilidad de sembrar y plantar en el interior de las celdas de la estructura.
- Notable resistencia a la tensión, desgarré, punzonamiento y fatiga.
- Producto estable en el transcurso del tiempo.
- Estructura a prueba de raíces.

Geoestera (geomat)

La geoestera se define como una estructura polimérica tridimensional, compuesta de dos o más capas sobrepuestas de mallas, con una malla intermedia corrugada mecánicamente, la cual manteniendo un espesor constante, produce un espacio entre las capas, lo que permite alojar algún tipo de material vegetal (pasto o hierba).

Se usa en aplicaciones de ingeniería civil (geotecnia, ambiental, hidráulica y transporte), principalmente para minimizar el efecto de la erosión y arrastre o desprendimientos de material sobre la superficie. Generalmente se fabrican de polietileno o polipropileno.

Las tres capas de mallas se aseguran con hiladas múltiples de puntadas de polipropileno, esto crea una estructura elástica, gruesa y porosa que es extremadamente resistente a la deformación y al daño durante la instalación, y lo suficientemente flexible para proporcionar un contacto profundo entre el suelo y la geoestera.

Un tipo de geoestera se elabora por extrusión de polietileno estirado, constituido por tres juegos ordenados de hilos que forman un conjunto de panel, de forma que el hilo central presenta una consistencia más densa que los otros dos hilos.

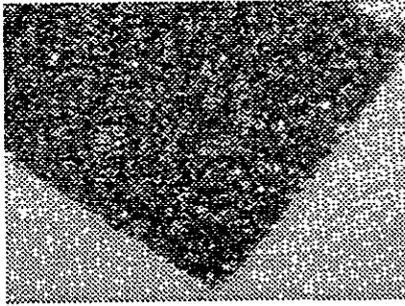


Figura 2.16 y 2.17 Diferentes tipos de geoesteras

Se usa para enverdecer cortes escarpados y pendientes erosionadas, en donde haya desplazamiento del estrato superficial. Así mismo, permite el sembrado de diversas variedades de semillas, cuyas raíces se anclan en la geoestera creando un bloque muy resistente a la fuerza del agua y a la fuerza de la gravedad; de modo que las raíces pueden crecer y desarrollarse en forma compacta, lo que contribuye a la estabilidad superficial de la pendiente. Otro tipo de geoestera se fabrica de polipropileno, es tridimensional y tiene diferentes espesores de aproximadamente 2 cm.

Existe también un producto llamado bioestera, compuesto por fibras naturales, paja y/o coco, unidas por dos fibras de plástico ligeras y fotodegradables por los rayos UV. Protege al suelo del golpe de la lluvia, previene que el escurrimiento arrastre el material fino y como se degrada naturalmente, provee de nutrientes a la vegetación. Es de gran ayuda en la construcción de taludes vegetados, ya que se utiliza como protección de la cara mientras la vegetación crece.

Geotubo (geotube)

Los geotubos son elementos elaborados en base de geotextiles de alta resistencia, con filamentos tridimensionales, que forman un contenedor estructural que confina el material creando una solución altamente flexible, de excelentes características físicas y mecánicas para el control de los más variados fenómenos que se pueden presentar en el medio ambiente; y así dar soluciones en menor tiempo que minimicen al máximo los daños ambientales, ya que se trata de inyección a presión de materiales dragados o succionados del sitio, directamente al geotubo.

Las uniones se elaboran con técnicas especiales de alta resistencia, capaces de soportar las presiones generadas durante las operaciones de bombeo.



Figura 2.18 Geotubo

Los diámetros del geotubo y el largo son determinados por los requisitos del proyecto. El geotubo es llenado acoplándose directamente a un sistema de bomba hidráulica que transporta el material dragado.

Al ser diseñado con aberturas de tamaño apropiadas, el tubo geosintético retiene el material de relleno mientras el agua filtra por la pared del tubo, ya sea en construcción seca como bajo agua.

El material puede ser retenido por el geotubo permanentemente si así se requiere. Una aplicación de los geotubos es instalarlos como núcleo de dunas de arena, formando una estructura monolítica para protección de marejadas y la erosión durante las tormentas. Una vez terminada la instalación, los geotubos son cubiertos con arena y se planta prado adecuado para dunas. El resultado es una duna de aspecto natural, que a la vez otorga una protección de larga duración.

Otras aplicaciones se dan en diques, rompeolas, diques de contención para material dragado, protección costera, hábitat para animales salvajes, construcción en zonas húmedas.

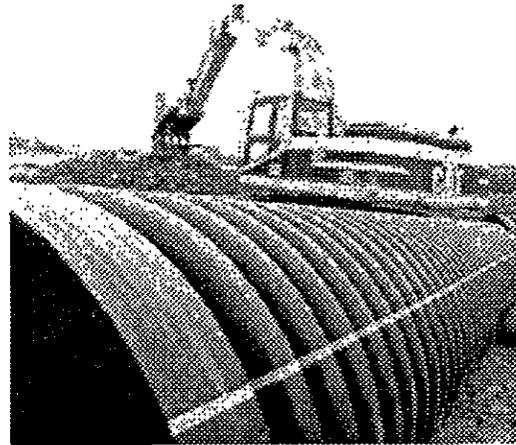


Figura 2.19 Geotubo como núcleo de dunas

Geospuma (geofom)

La geospuma es un producto polimérico, formado por el uso de un polímero semi-líquido mediante un agente espumoso, lo que da como resultado un producto ligero con alto contenido de vacíos, usado en contacto con suelo, roca o cualquier otro material geotécnico en aplicaciones de ingeniería civil.

La geospuma proporciona un material de relleno con peso ligero y excelentes propiedades de compresión, es ideal para carreteras, terraplenes o proyectos de edificación. Existe la capacidad y equipo técnico para proveer de grandes volúmenes, según se requiera. La espuma celular rígida en forma de poliestireno expandido (EPS), ha sido usada como relleno extraligero de suelos y aislante geotécnico por más de 25 años, en suelos blandos, taludes, muros de retención y rellenos de apoyo. Los elementos del suelo detrás de los muros de retención están sujetos a esfuerzos de carga vertical y lateral de por vida; pero si se utiliza la geospuma, debido a su peso ligero que es mucho menor que el del suelo, la presión lateral debida al propio peso disminuye significativamente.



Figura 2.20 Terraplén aligerado con geospuma

En los muros de contención, generalmente el relleno es material granular en capas, que requiere de compactación; en contraste, la geospuma no la necesita, la construcción es rápida y puede darse en cualquier época del año.

En los muros de contención, generalmente el relleno es material granular en capas, que requiere de compactación; en contraste, la geospuma no la necesita, la construcción es rápida y puede darse en cualquier época del año.

Las cimentaciones de puentes y cualquier construcción en general, están casi siempre construidas sobre el suelo. Si el suelo de capas inferiores es débil o compresible, el comportamiento y vida útil de la estructura puede estar en dilema. Con la geospuma como sustituto ligero del suelo, se han dado aplicaciones creativas para proporcionar más estabilidad a la estructura en suelos relativamente pobres.



Figura 2.21 Terraplén con geoespuma (otra vista de la figura 2.20)

A lo largo de los estados y ciudades de Estados Unidos, existen numerosos taludes y terraplenes en suelo blando que sufren continuamente de asentamientos; este problema persistente en diversas zonas requiere de constante mantenimiento y reparación.

Los terraplenes en suelos blandos con asentamientos permanentes, el colocar más material se incrementa la masa de suelo y seguramente provocará mayor asentamiento. Para este tipo de problemas, la geoespuma resulta una solución efectiva y óptima de una sola aplicación.

Geocompuestos (geocomposites)

Los geocompuestos están formados por materiales poliméricos ensamblados, en donde al menos uno es geosintético, se usa en contacto con el suelo, roca o cualquier otro material geotécnico en aplicaciones de ingeniería civil. Son manufacturados en forma de lienzo o tira, y al combinar las características de sus componentes, dan como resultado un sistema multi-funcional.

Las combinaciones de geosintéticos son muy variadas:

- geotextil y geomalla
- geomembrana y geomalla
- geotextil, georred y geomembrana
- geotextil y geocelda
- geotextil y georred
- geomembrana y georred
- geotextil y geomembrana

o cualquier otra combinación de los anteriores con tubos, cables de acero, anclas, etc.

En esta área se ha manifestado ampliamente la creatividad de los ingenieros, constructores, fabricantes y diseñadores, generando una múltiple singularidad de usos.

El acoplamiento del geotextil con acción filtrante, con la geomembrana de cualidades impermeabilizantes y la georred con capacidad drenante y distribuidora de las cargas, permite la creación de un sistema completo "FILTRO-DREN-PROTECCIÓN", extremadamente compacto y de simple uso.

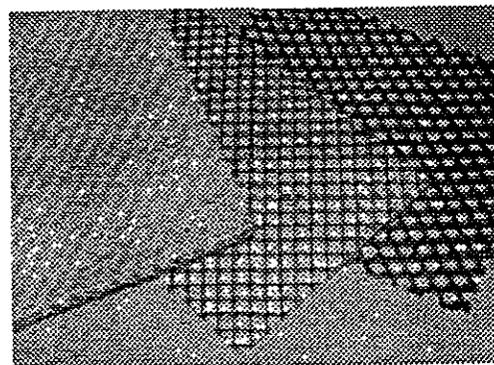
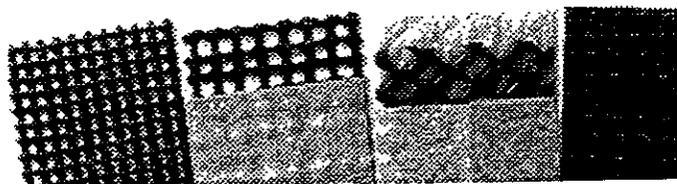


Figura 2.22 Diferentes geocompuestos

Algunas ventajas de este geocompuesto son:

- Eliminación de filtros graduales realizados con arena y grava, lo que genera ahorro en la adquisición y colocación de dichos materiales en la obra.
- Flexibilidad y ligereza.
- Reducción en el costo de excavación.
- Fácil colocación en obra, aún en circunstancias adversas.
- Resistencia a la erosión y corrosión.
- Resistencia al empuje del terreno, las cuales pudieran ser: distribución de fuerzas concentradas, capacidad elevada de filtración e incluso drenado con cargas elevadas.
- Protección mecánica al manto impermeable durante la fase de entierro.
- Fijación simple y temporal, ya que se asegura posteriormente por el empuje mismo del terreno o de los materiales en contacto.

Entre las aplicaciones de este tipo de geocompuestos se tienen: descarga controlada, drenaje vertical en sótanos y semisótanos, drenaje de bases en carreteras, plazas, parques, jardines y campos deportivos, balasto en ferrovías, drenaje en muros de contención, drenaje de túneles y encofrado perdido (el geocompuesto se coloca en el espacio intermedio entre el terreno excavado y la superficie adyacente de la cimentación, para la limitación del estrato durante la construcción, permitiendo así el drenado del agua que se filtre a través de la superficie del terreno).

Otra combinación de geocompuesto es la de geotextiles con georredes, que permiten la separación de dos suelos distintos, evitando la combinación entre grava y arcilla, además de prevenir la acumulación de agua y mantener una base bien drenada.

Otra geocompuesto se forma de geomallas bi-orientadas y un geotextil no tejido, o dos no tejidos térmicamente unidos a las geomallas. Esta combinación puede considerarse como "geotextiles reforzados", ya que tienen la capacidad de filtración y separación, típica de los geotextiles no tejidos; además de una alta resistencia a la tensión, propiedad de las geomallas.

A continuación se nombran varios geocompuestos y sus aplicaciones:

Muros y Taludes de tierra reforzada

Geomallas y geotextiles

- Reconstrucción de fallas de borde y deslizamiento.
- Estabilización de taludes y terraplenes.
- Ampliación de terrenos y áreas verdes.
- Muros reforestables o con fachadas de concreto.

Estabilización de suelos

Geomallas y geotextiles

- Refuerzo de bases en vías pavimentadas y no pavimentadas.
- Consolidación de vías férreas y pistas de aterrizaje.
- Refuerzo de piso para patios industriales.

Gaviones y control de erosión

Gaviones, geomallas y otros geosintéticos

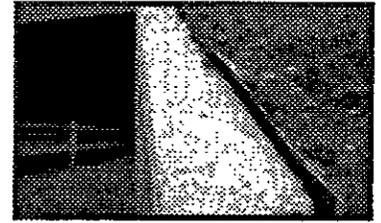
- Defensas fluviales, marítimas y lacustre.
- Protección de riveras y canalizaciones.
- Construcción de diques y represas.

- Muros y estructuras de contención.
- Protección contra caída de piedras.
- Reforestación de taludes.

Drenaje y filtración de suelos

Geotextiles y otros geosintéticos

- Drenaje de jardines y campos deportivos.
- Drenajes en vialidad (Francés-aleta-planar).
- Drenaje de muros y taludes.
- Protección de muros de gaviones.
- Drenaje en cimentaciones.
- Sistema de mechas drenantes.
- Geodrenes y subdrenajes.

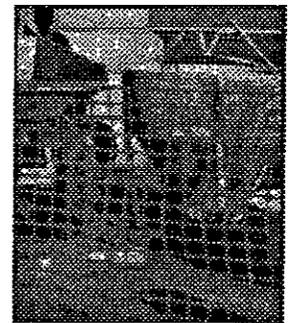


Figuras 2.23 Drenaje de muro

Cercas de seguridad y señalización

Geomallas y cercas

- Cercas perimetrales y tapa vista.
- Señalización de obras y demarcación.
- Señalización de tuberías y cableados subterráneos.
- Malla antideslumbrante para vialidad.



Figuras 2.24 Geomalla para cerca

Refuerzos de frisos y concretos

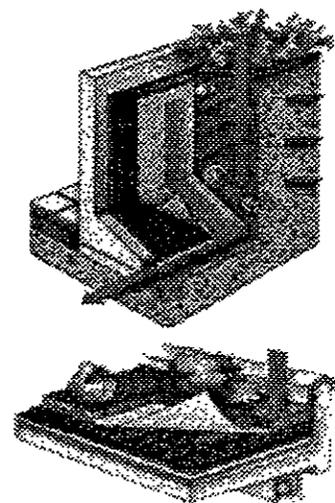
Mallas y fibras

- Fibra de polipropileno para refuerzo de concreto.
- Malla para refuerzo de friso (conjunto de elementos decorativos en forma de faja muy alargada).
- Malla para retracción de grietas en concreto.

Impermeabilización

Geomembranas y otros geosintéticos

- Impermeabilización de techos.
- Barrera de vapor.
- Impermeabilización de fundaciones.
- Control de nivel freático.
- Cobertores flotantes.
- Impermeabilización de suelos/separación.
- Impermeabilización de pisos industriales.
- Impermeabilización de tanques de concreto.
- Repavimentación.
- Geomallas y geotextiles.
- Refuerzo de pavimento con geomallas.
- Control de grietas en pavimento con geotextil.



Figuras 2.25 Impermeabilización

Saneamiento Ambiental

Geomembranas y otros geosintéticos

- Disposición de desechos peligrosos y no peligrosos.
- Lagunas de oxidación.
- rellenos sanitarios y tapados.
- Minería - Barrera para lixiviados.
- Biorremediación (land farming) + encapsulado.
- Contenedores secundarios.
- Localizaciones petroleras.
- Cobertores flotantes.

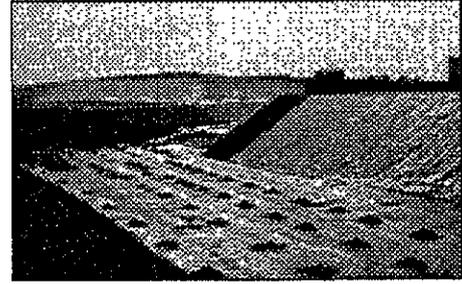


Figura 2.26 Relleno sanitario (uso de geotextiles, geomembranas y geomallas entre otros).

Aguas Blancas

Geomembranas y otros geosintéticos

- Paisajismo - Lagunas recreacionales.
- Reservorios y canales de conducción de agua.
- Acuicultura (Acuaculture Linings Systems).

2.4 Simbología estandarizada de los geosintéticos

Actualmente, la Secretaría de *Symposiums* Internacionales de Geosintéticos (IGS Secretariat), en la tercera edición de su folleto técnico "Recomendaciones, Descripciones de Geosintéticos. Funciones, Terminología de Geosintéticos, Símbolos Matemáticos y Gráficos"; proporciona una amplia gama de datos técnicos con el fin de estandarizar el manejo de palabras, definiciones, funciones y dibujos relativos a geosintéticos con base en el manejo internacional de estos productos.

A continuación se enunciarán los símbolos usados para las diferentes funciones de los geosintéticos:

- B Barrera (fluido)
- D Drenaje
- E Control de erosión superficial
- F Filtración
- P Protección
- R Refuerzo
- S Separación

Ei. Geotextil de separación



Ej. Geotextil de refuerzo



Figura 2.27 Ejemplos uso de simbología

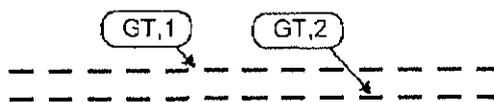
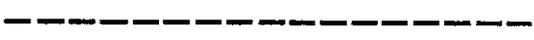
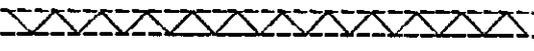
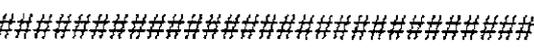
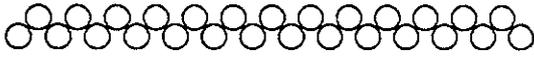


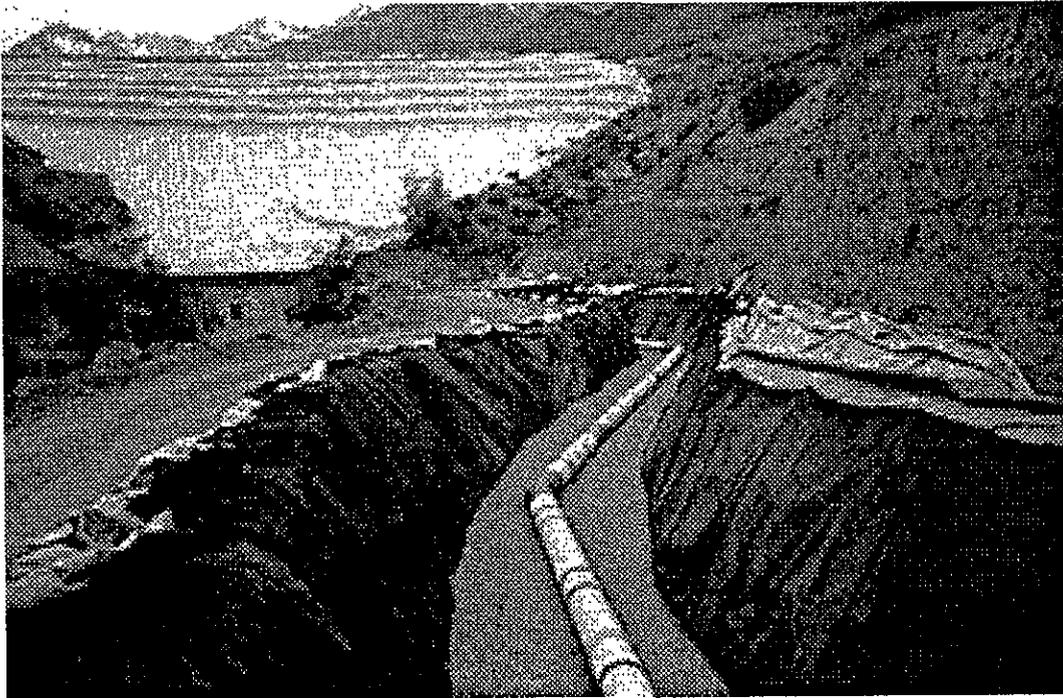
Figura 2.28 Diversos productos en un mismo diagrama

Símbolos gráficos de los geosintéticos:

GT		Geotextil (genérico)
GM		Geomembrana (genérico)
GG		Geomalla (genérico)
GCD		Geocompuesto de drenaje (genérico) con geotextil en ambos lados (genérico)
GN		Georred (genérico)
GCL		Geocompuesto bentonítico (Geocomposite clay liner) (genérico)
GEC		Geosintético superficial para control de erosión (genérico)
GL		Geocelda (genérico)
GA		Geoestera (genérico)

2.5 Diagrama de funciones generales de los geosintéticos

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN BREVE	PRODUCTO
Filtración	Permite el paso de fluidos previniendo la migración de partículas de suelo	geotextil geocompuesto
Drenaje	Transporte de fluidos	georred geocompuesto
Separación	Previene la mezcla de estratos o materiales diferentes	geotextil geocompuesto
Protección	Previene daños a la estructura material del suelo u otro geosintético	geotextil no tejido georredes geocompuestos
Impermeabilización	Barrera de fluidos	geomembranas geocompuestos
Refuerzo de muros y taludes	Provee al suelo de resistencia a los esfuerzos de tensión	geomallas mono-orientadas geomallas bi-orientadas
Refuerzo de suelos blandos	Incrementa la capacidad de carga	geomallas bi-orientadas geotextiles geocompuestos
Refuerzo de concreto/asfalto	Provee a los materiales de resistencia a la tensión y fatiga	geomallas bi-orientadas
Control de erosión o estabilización superficial	Previene el deslave y la erosión superficial del suelo causados por el agua y por el viento	geoesteras geoceldas bioesteras biorredes
Confinamiento	Restringe el movimiento lateral de la masa de suelo	geoceldas



3. GEOTEXTILES

- **Fibras naturales.** Pueden ser de origen animal (lana, seda, pelos...), vegetal (algodón, yute, esparto, coco, lino...), que se utilizan para la fabricación de geotextiles biodegradables utilizados en la revegetación de taludes, en márgenes de ríos, etcétera; y mineral (amianto, vidrio, metales, entre otros).

- **Fibras artificiales.** Son las derivadas de la celulosa, como el rayón, la viscosa y el acetato.

- **Fibras sintéticas.** Cuando al geotextil se le exige durabilidad, se fabrica con fibras o filamentos obtenidos de polímeros sintéticos. Los más empleados son el poliéster, polipropileno, polietileno, poliamida y poliacrílico. Los geotextiles fabricados con estos polímeros son imputrefactos, resistentes a los ataques de microorganismos y bacterias, y de gran durabilidad.

El polipropileno es estable dentro de un margen de pH de 2 a 13, lo que lo convierte en uno de los polímeros más estables para geotextiles disponible hoy en día.

Los polímeros utilizados en la fabricación de las fibras que conforman el geotextil son, de acuerdo a su importancia de uso (Koerner 1994):

- Polipropileno (aproximadamente 83%)
- Poliéster (aproximadamente 14%)
- Polietileno (aproximadamente 2%)
- Poliamida (nylon, aproximadamente 1%)

A continuación se presenta la tabla 3.1, que muestra una relación de los polímeros utilizados en diversos productos geosintéticos, incluyendo obviamente los geotextiles.

Tabla 3.1 Uso de los polímeros principales en diversos geosintéticos

Polímero	Tipo de geosintéticos
Polietileno (PE)	Geotextiles, geomembranas, geomallas, georredes, geotubos, geocompuestos
Polipropileno (PP)	Geotextiles, geomembranas, geomallas, geocompuestos
Policloruro de vinilo (PVC)	Geomembranas, geocompuestos, geotubos
Poliéster (Polietileno tereftalato PET)	Geotextiles, georredes
Poliamida (nylon6/6 PA)	Geotextiles, georredes, geocompuestos
Poliestireno (PS)	Geocompuestos

Koerner (1994) hace la observación de que la humedad tiene un papel relativamente menor en la resistencia, que sólo las poliolefinas (polipropileno y polietileno) son más ligeras que el agua, que el poliéster absorbe la menor cantidad de agua y que todos tienen altos puntos de fusión.

El polímero se convierte en fibras (o hilos que pueden ser de una o más fibras) al fundir la materia prima y forzarla a pasar a través de un *spinneret*, que es semejante a una regadera. Los filamentos de fibras resultantes son endurecidos y solidificados por uno de los tres procesos siguientes: húmedo, secado o colada.

La mayoría de las fibras utilizadas en la elaboración de geotextiles son hechas a través del proceso de colada, que incluye las poliolefinas, poliéster y nylon. El endurecido de los filamentos se logra enfriando y, simultánea o subsecuentemente estirándolos, así al aplicar la tensión se reduce la sección transversal (diámetro) del filamento, lo que provoca que las moléculas de las fibras se acomoden de manera ordenada, alineándose en el sentido de la tensión. El estiramiento origina un incremento en la resistencia a la tensión, en el módulo de elasticidad, en la resistencia a la humedad y reduce la elongación.

Cabe señalar la importancia de que el usuario tenga presente que al someter dichos materiales a temperaturas cercanas a su temperatura de ablandamiento (los plásticos no presentan punto de fusión exacto, sino más bien un rango amplio), la orientación de las moléculas se perderá junto con las características de resistencia mencionadas.

3.3 Clasificación de los geotextiles

Se retoma la definición de la ASTM de un geotextil como: producto textil permeable hecho de polímero (natural o sintético) en forma de lienzo, que es utilizado en combinación con la cimentación, suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre.

Tabla 3.2 Clasificación de los geotextiles

Estructura	No tejida (Nonwoven)	Tejida (Woven)	Tejida (knitted)
Materia Prima	Polipropileno, poliéster, polietileno, poliamida, nylon, etcétera.		
Tipo de fibra	Filamentos continuos Filamento básico	Monofilamento Multifilamento Tirillas, cintillas Fibrilado	Multifilamento
Proceso de unión	Mecánico (punzonado) Térmico o Termosellado Químico	Entretejido	Tejido de punto o de malla (tricotado)
Masa por unidad de área	Rango típico desde 135 g/m ² a 680 g/m ²		

3.3.1 Clasificación de los geotextiles según su método de fabricación

Geotextiles tejidos (*woven geotextile*)

Son aquellos formados por dos o más juegos de fibras, hilos, filamentos o cintas, entrecruzados generalmente en ángulos rectos en una máquina de tejer. Se fabrican comúnmente de polipropileno, poliéster y polietileno. En general, las telas tejidas son muy resistentes a la tensión, tienen un módulo de elasticidad elevado y elongación baja.

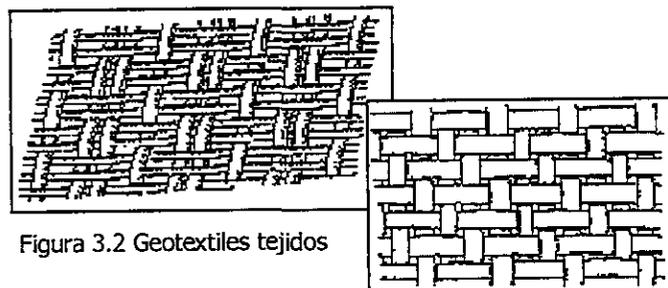


Figura 3.2 Geotextiles tejidos

Pueden ser tejidos de calada (labor de aguja en una tela, sacando o juntando hilos) o tricotados (tricotar: tejer, hacer labores de punto). Los tejidos de calada son los formados por hilos de urdimbre (sentido longitudinal) y de trama (sentido transversal). Su resistencia a la tensión es de tipo biaxial (en los DOS sentidos de su fabricación) y puede ser muy elevada (según las características de los hilos empleados). Su estructura es plana.

Los tricotados están fabricados con hilo entrecruzado en máquinas de tejido de punto. Su resistencia a la tensión puede ser multiaxial o biaxial según estén fabricados en máquinas tricotasas y circulares o *ketten* y *raschel*. Su estructura es tridimensional. A este tipo de geotextil tejido se le conoce en Estados Unidos como **knitted geotextile**, también conocidos como de punto de malla o malla tipo cadena.

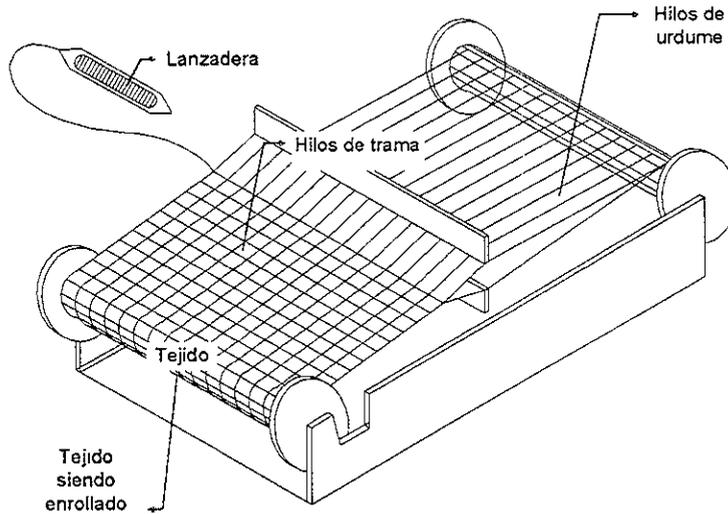


Figura 3.3 Detalle de la fabricación de geotextiles tejidos

Varios tipos de fibras se utilizan para variar los patrones de tejido en las telas geotextiles. Así, una fibra de multifilamentos consiste de muchos filamentos finos, continuos que se unen al torcer o mezclar las hebras. Un monofilamento es una hebra única. Una fibra de película cortada es una hebra plana, tipo cinta que se obtiene al cortar una película polimérica extruida. Cintas fibriladas se obtienen al separar y torcer las películas extruidas (*raffia*). Las características principales de los geotextiles tejidos son que su módulo de tensión varía de intermedio a alto, varía el movimiento relativo entre las fibras, pueden ser isotrópicos o anisotrópicos y el tamaño de abertura es constante por lo que se mide con procedimientos sencillos.

Geotextiles no tejidos (*non woven geotextile*)

Están formados por fibras o filamentos superpuestos en forma laminar, cuya estructura se consolida por distintos procesos.

Los geotextiles se producen frecuentemente mediante la combinación de dos tipos de procesos, el primero es la formación de la fibra de donde se obtiene, o un filamento continuo o una fibra principal (corta). Según cual sea el proceso empleado para unir los filamentos o fibras, los geotextiles no tejidos se clasifican a su vez en:

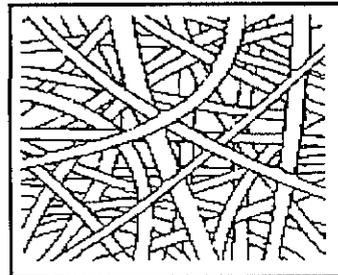


Figura 3.4 Geotextil no tejido

Geotextiles no tejidos ligados mecánicamente o agujados

Se forman a partir de una superposición de fibras o filamentos ordenados aleatoriamente (napa) que se consolida al pasar por un campo de agujas en la máquina punzonadora. Se usan filamentos continuos o bien fibras cortas (típicamente 0.15m de longitud), los polímeros más usuales son el polipropileno y el poliéster.

Las agujas de la máquina se mueven en un solo sentido alternativo, subiendo y bajando muy rápidamente, penetrando en la napa y entrelazando las fibras; esto se consigue porque el perfil de las agujas no es regular, ya que están provistas de unas espigas o salientes en dirección a su sentido de penetración, lo cual hace penetrar a las fibras sin llevárselas en su movimiento de retroceso.

La frecuencia de los golpes o penetraciones de las agujas va consolidando el geotextil no tejido. Los geotextiles fabricados por este proceso tienen buenas propiedades mecánicas manteniendo parte del espesor de la napa, el cual les confiere mayor estructura tridimensional, gran elongación (pueden estirarse desde un 40% hasta un 120% o más antes de entrar en carga de rotura), lo que les proporciona muy buena adaptabilidad a los terrenos, unas excelentes propiedades para protección (suele denominarse efecto colchón o amortiguamiento) y muy buenas funciones de filtración y separación.

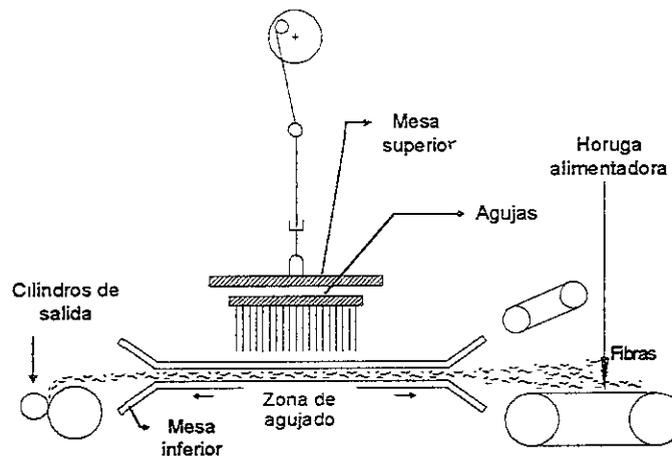


Figura 3.5 Proceso mecánico. Entrelazamiento de las fibras o filamentos por medio de agujas dentadas

Entre las características principales de este tipo de geotextiles se tienen que existe movimiento relativo entre las fibras, son productos con apariencia de felpa, gruesos, con módulo de tensión intermedio en los grados de peso intermedio. Pueden fabricarse isotrópicos o anisotrópicos. Su peso por unidad de área es promedio por la falta de homogeneidad total en la distribución de la fibra. Los tamaños de abertura deben medirse por métodos indirectos, con mayor imprecisión que para los termosellados. Su espesor y permeabilidad varían con la presión.

Algunas veces, a este tipo de geotextiles se les imparte un acabado de impregnación de resinas de tipo acrílico, que aumenta la resistencia a la tensión y el módulo de resistencia a la perforación, pero reduce la elongación y la resistencia al rasgado, por lo que se debe aplicar un secado especial para restablecer la permeabilidad.

Geotextiles no tejidos ligados térmicamente, termosellados, termosoldados o termofijados

Los filamentos se orientan en forma irregular, distribuyéndose en todos los sentidos, formando una napa en la que la unión de fibras y consolidación del geotextil se logra por fusión de las fibras y soldadura en los puntos de intersección, mediante un calandrado a temperatura elevada. La materia prima utilizada son filamentos continuos de polipropileno o nylon/polietileno, un porcentaje de los filamentos se funde primero manteniéndose intacta la resistencia de los filamentos restantes.

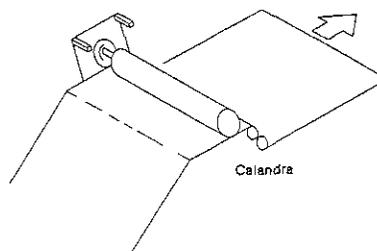


Figura 3.6 Proceso térmico

Su espesor y su elongación son algo menores a la de los agujados, por lo cual su transmisividad y permeabilidad son menores, tienen buenas propiedades mecánicas y poca adaptabilidad (son algo rígidos). Se caracterizan porque no existe movimiento relativo entre las fibras, son productos ligeros de espesor reducido, con módulo de tensión intermedio y prácticamente isotrópico. Su peso por unidad de área es promedio por la falta de homogeneidad total en la distribución de la fibra. Presentan una variedad amplia de tamaños de abertura que es necesario medir por métodos indirectos.

Geotextiles no tejidos ligados químicamente o resinados

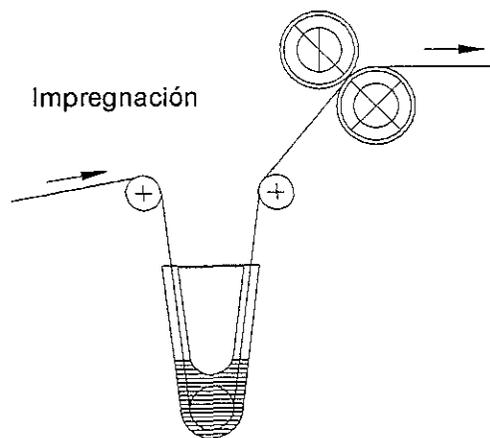


Figura 3.7 Proceso químico

La unión entre sus filamentos se consigue incorporando ligantes químicos o resinas. Este sistema no se utiliza para la fabricación de geotextiles de protección y separación, puesto que en su composición (de los de protección) deben de evitarse elementos químicos distintos a los polímeros, que pudiesen alterar sus propiedades y provocar incompatibilidades químicas con otros materiales con los que pudiese estar en contacto.

Por último, dentro de esta clasificación de geotextiles no tejidos, según su método de fabricación incorporaríamos aquellos que se pueden fabricar con combinaciones de los sistemas de fabricación que hemos descrito.

3.3.2 Comportamiento físico en función del proceso de fabricación

A continuación se presenta un listado sencillo del comportamiento físico de cada tipo de geotextil, de acuerdo con su proceso de fabricación:

Geotextil tejido

- Buena resistencia en los sentidos de fabricación
- Anisotrópico
- Baja fricción de interfase
- Bajo alargamiento

- Poca resistencia contra la propagación del rasgado
- Baja flexibilidad
- Mal desempeño como filtro
- Poros muy grandes y en pequeña cantidad
- Riesgo de taponamiento, incrementando el tamaño de los poros
- No ejecuta drenaje en el sentido planar

Geotextil no tejido agujado

- Isotropía mediana
- Excelente fricción de interfase
- Alargamiento adecuado
- Alta resistencia a la propagación del rasgado
- Buena flexibilidad
- Excelente desempeño como filtro
- Alta permeabilidad
- Buen drenaje en el sentido planar
- Si es de fibras cortas: mayor resistencia transversal
- Si es de filamentos continuos: menor resistencia transversal

Geotextil no tejido termosellado

- Isotrópico
- Bajo fricción de interfase
- Bajo alargamiento debido a carga de trabajo
- Buena resistencia a la propagación del rasgado
- Baja flexibilidad
- Buen desempeño como filtro
- Menor permeabilidad en relación al geotextil agujado
- Baja drenaje en el sentido planar

Geotextil no tejido agujado y termosellado

- Isotropía mediana
- Buena fricción de interfase
- Excelente comportamiento tensión-deformación
- Menor alargamiento residual
- Elevada resistencia a la propagación del rasgado
- Buena flexibilidad
- Bueno desempeño como filtro
- Buena permeabilidad
- Buen drenaje en el sentido planar

3.4 Propiedades

Las propiedades físicas guardan cierta similitud con las de los suelos, por ejemplo, el tamaño de las aberturas y orificios y la porosidad. En cuanto a las propiedades hidráulicas, la permisividad en los geotextiles es similar a la permeabilidad en dirección normal al medio permeable, y la transmisividad a la permeabilidad en sentido paralelo a la estratificación (o al medio permeable, el geotextil).

Las propiedades mecánicas de los geotextiles son diferentes a las de los suelos, en especial cuando se habla de la resistencia a la tensión o tracción.

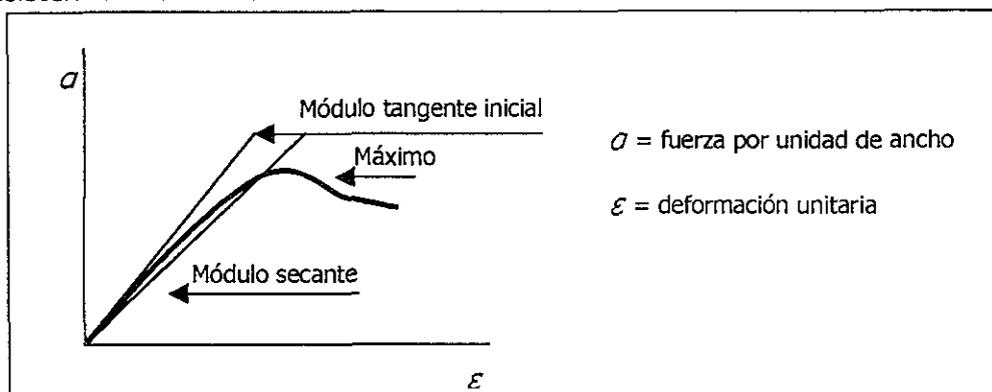


Figura 3.8 Resistencia a la tensión

Además, hay influencia notable de los esfuerzos de compresión:

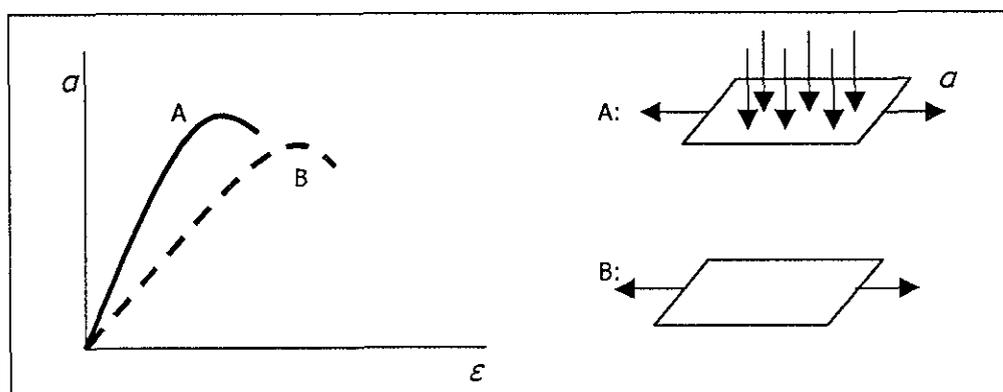


Figura 3.9 Influencia de los esfuerzos de compresión en geotextiles

Se dice que la interacción suelo-geotextil gobierna su funcionamiento desde el punto de vista mecánico. A continuación se presenta la tabla 3.3 de propiedades de los geotextiles y factores que controlan o predominan en la propiedad dada (Haliburton, 1981).

Tabla 3.3 Propiedades de los geotextiles y factores que predominan

Propiedad	Factor que controla o predomina	
	Polímero	Fabricación
Peso específico	gran efecto	efecto insignificante
Espesor	efecto ligero	gran efecto
Absorción de agua	efecto ligero	gran efecto
Homogeneidad	efecto insignificante	gran efecto
Propiedades mecánicas **		
Resistencia a la tensión	efecto significativo	gran efecto
Elongación a la ruptura	efecto significativo	gran efecto
Relación carga-elongación	efecto significativo	gran efecto
Elongación bajo carga estática	gran efecto	gran efecto
Fatiga	efecto ligero	gran efecto
Resistencia a la perforación	efecto ligero	gran efecto
Resistencia al reventamiento	efecto significativo	gran efecto
Resistencia a la abrasión	efecto significativo	gran efecto
Fricción	efecto ligero	efecto significativo
Isotropía	efecto insignificante	gran efecto

Continuación de la tabla 3.3

Propiedades hidráulicas		
Permeabilidad transversal	efecto insignificante	gran efecto
Capacidad de filtración	efecto insignificante	gran efecto
Resistencia al taponamiento	efecto desconocido	gran efecto
Propiedades de durabilidad		
Estabilidad biológica	gran efecto	efecto insignificante
Estabilidad a la luz ultravioleta	gran efecto	efecto ligero
Estabilidad química	gran efecto	efecto insignificante
Estabilidad térmica	gran efecto	efecto insignificante

** Las propiedades mecánicas pueden variar muchísimo para un geotextil aislado contra el resultado de un geotextil en el suelo o agregado. El-Farmaoui y Nowatzki (1982) reportan incrementos mayores al 200% en la resistencia a la tensión de geotextiles confinados en ensayos de laboratorio.

3.4.1 Propiedades de los geotextiles y su relación con la función que desempeñan

Propiedades físicas

Masa por unidad de área: Esta propiedad es muy utilizada para comparar geotextiles entre sí, ya que el costo es directamente proporcional a la masa por unidad de área, al igual que el costo de instalación. Su homogeneidad indica la homogeneidad de las propiedades mecánicas. La masa (peso) debe medirse casi al 0.01% del total de la masa del espécimen, y la longitud y el ancho deben medirse sin someter al geotextil a tensión. Los rangos típicos para la mayoría de los geotextiles varían de 4 a 20 oz/yd² (135 a 680 g/m²). Nótese que 1 oz/yd² equivale a 33.9 g/m².

Espesor: Se determina a diferentes presiones. A mayor espesor, mayor permeabilidad en el plano de la tela y mayor potencial de absorción de agua. Al variar esta propiedad con la presión, cambia la distribución de aberturas, la capacidad filtrante, la permeabilidad, etcétera. Dentro de la terminología para geotextiles de la ASTM, se menciona la propiedad "espesor comprimido", que es el espesor de un geotextil bajo un esfuerzo normal específico. La prueba estandarizada de ASTM estipula que el espesor de un geotextil debe medirse con una aproximación de al menos 0.001 in (0.02 mm) bajo una presión de 2.0 kPa (=0.29 lb/in² = 42 lb/ft²). Los espesores de los geotextiles comunes varían de 10 a 300 mils. Nótese que 1 mil equivale a 0.001 in.

Gravedad específica: Propiedad definida por el polímero que constituye la tela. El polietileno y el polipropileno tienen una gravedad específica menor a 1, lo que indica que el peso de un volumen unitario de dichos polímeros es menor que el correspondiente al agua destilada a 4°C. Es decir, indica si el geotextil flota o no en el agua; tiene relación con la facilidad y costo de colocar al geotextil en zonas inundadas o en el mar. Se relaciona con el costo de instalación. A continuación se nombran algunos valores de gravedad específica para diferentes materiales:

Acero	7.87
Suelo/roca	2.9 a 2.4
Vidrio	2.54
Cloruro de polivinilo	1.69
Algodón	1.55
Poliéster	1.38 a 1.22
Nylon	1.14 a 1.05
Polietileno	0.96 a 0.90
Polipropileno	0.91

Las propiedades mecánicas de los geotextiles son diferentes a las de los suelos, en especial cuando se habla de la resistencia a la tensión o tracción.

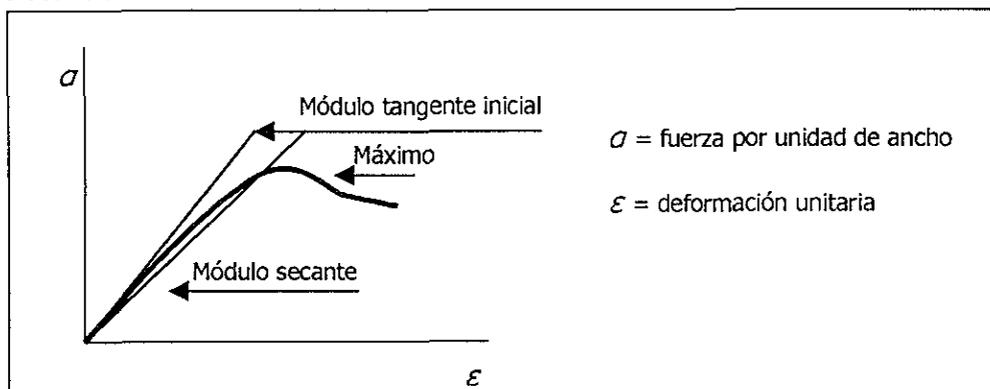


Figura 3.8 Resistencia a la tensión

Además, hay influencia notable de los esfuerzos de compresión:

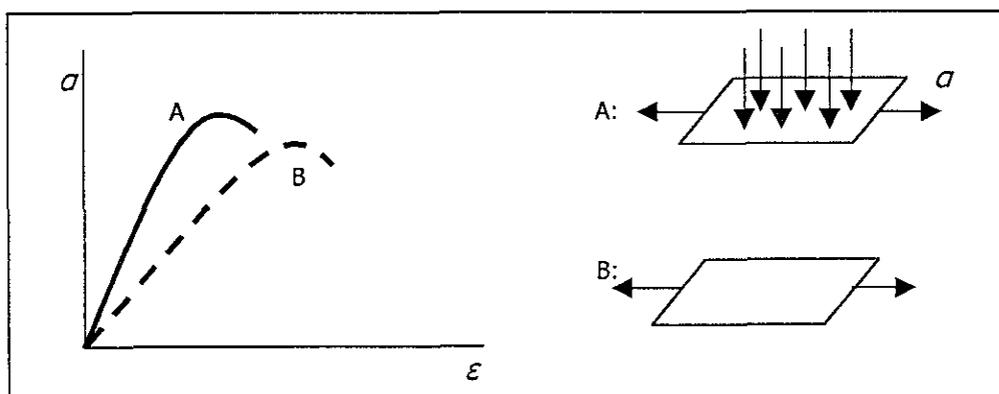


Figura 3.9 Influencia de los esfuerzos de compresión en geotextiles

Se dice que la interacción suelo-geotextil gobierna su funcionamiento desde el punto de vista mecánico. A continuación se presenta la tabla 3.3 de propiedades de los geotextiles y factores que controlan o predominan en la propiedad dada (Haliburton, 1981).

Tabla 3.3 Propiedades de los geotextiles y factores que predominan

Propiedad	Factor que controla o predomina	
	Polímero	Fabricación
Peso específico	gran efecto	efecto insignificante
Espesor	efecto ligero	gran efecto
Absorción de agua	efecto ligero	gran efecto
Homogeneidad	efecto insignificante	gran efecto
Propiedades mecánicas **		
Resistencia a la tensión	efecto significativo	gran efecto
Elongación a la ruptura	efecto significativo	gran efecto
Relación carga-elongación	efecto significativo	gran efecto
Elongación bajo carga estática	gran efecto	gran efecto
Fatiga	efecto ligero	gran efecto
Resistencia a la perforación	efecto ligero	gran efecto
Resistencia al reventamiento	efecto significativo	gran efecto
Resistencia a la abrasión	efecto significativo	gran efecto
Fricción	efecto ligero	efecto significativo
Isotropía	efecto insignificante	gran efecto

Continuación de la tabla 3.3

Propiedades hidráulicas		
Permeabilidad transversal	efecto insignificante	gran efecto
Capacidad de filtración	efecto insignificante	gran efecto
Resistencia al taponamiento	efecto desconocido	gran efecto
Propiedades de durabilidad		
Estabilidad biológica	gran efecto	efecto insignificante
Estabilidad a la luz ultravioleta	gran efecto	efecto ligero
Estabilidad química	gran efecto	efecto insignificante
Estabilidad térmica	gran efecto	efecto insignificante

** Las propiedades mecánicas pueden variar muchísimo para un geotextil aislado contra el resultado de un geotextil en el suelo o agregado. El-Farmaoui y Nowatzki (1982) reportan incrementos mayores al 200% en la resistencia a la tensión de geotextiles confinados en ensayos de laboratorio.

3.4.1 Propiedades de los geotextiles y su relación con la función que desempeñan

Propiedades físicas

Masa por unidad de área: Esta propiedad es muy utilizada para comparar geotextiles entre sí, ya que el costo es directamente proporcional a la masa por unidad de área, al igual que el costo de instalación. Su homogeneidad indica la homogeneidad de las propiedades mecánicas. La masa (peso) debe medirse casi al 0.01% del total de la masa del espécimen, y la longitud y el ancho deben medirse sin someter al geotextil a tensión. Los rangos típicos para la mayoría de los geotextiles varían de 4 a 20 oz/yd² (135 a 680 g/m²). Nótese que 1 oz/yd² equivale a 33.9 g/m².

Espesor: Se determina a diferentes presiones. A mayor espesor, mayor permeabilidad en el plano de la tela y mayor potencial de absorción de agua. Al variar esta propiedad con la presión, cambia la distribución de aberturas, la capacidad filtrante, la permeabilidad, etcétera. Dentro de la terminología para geotextiles de la ASTM, se menciona la propiedad "espesor comprimido", que es el espesor de un geotextil bajo un esfuerzo normal específico. La prueba estandarizada de ASTM estipula que el espesor de un geotextil debe medirse con una aproximación de al menos 0.001 in (0.02 mm) bajo una presión de 2.0 kPa (=0.29 lb/in² = 42 lb/ft²). Los espesores de los geotextiles comunes varían de 10 a 300 mils. Nótese que 1 mil equivale a 0.001 in.

Gravedad específica: Propiedad definida por el polímero que constituye la tela. El polietileno y el polipropileno tienen una gravedad específica menor a 1, lo que indica que el peso de un volumen unitario de dichos polímeros es menor que el correspondiente al agua destilada a 4°C. Es decir, indica si el geotextil flota o no en el agua; tiene relación con la facilidad y costo de colocar al geotextil en zonas inundadas o en el mar. Se relaciona con el costo de instalación. A continuación se nombran algunos valores de gravedad específica para diferentes materiales:

Acero	7.87
Suelo/roca	2.9 a 2.4
Vidrio	2.54
Cloruro de polivinilo	1.69
Algodón	1.55
Poliéster	1.38 a 1.22
Nylon	1.14 a 1.05
Polietileno	0.96 a 0.90
Polipropileno	0.91

Dureza: La dureza o flexibilidad de un producto no debe confundirse con su módulo, el cual se determina en la porción inicial de la curva esfuerzo-deformación. En esta prueba, la dureza es una medida de la interacción entre el peso del geotextil y su dureza (flexibilidad), mostrado al ver que el geotextil por gravedad se dobla bajo su propio peso. La propiedad es indicativa de la capacidad inherente del geotextil de proveer una superficie de trabajo adecuada en la instalación. En suelos extremadamente blandos, una alta flexibilidad del geotextil es deseable.

Propiedades mecánicas

Resistencia a la tensión "Grab": Existe cierto paralelismo entre la forma de ensayar al geotextil y lo que físicamente le sucede a dicho material cuando se extiende agregado sobre él; esta propiedad se emplea para comparar daños teóricos por instalación contra la resistencia del geotextil contemplado en el proyecto y para el control de calidad.

Elongación aparente: Es una de las propiedades que mejor se relaciona con la resistencia a daños en la instalación, pues la elongación es otro componente de la respuesta del material a la aplicación de un esfuerzo de tensión. Esta propiedad en combinación con la resistencia a la tensión (también nombrada carga de ruptura) del material, dan la resistencia total combinada en los casos en que las sollicitaciones mecánicas impuestas al geotextil se manifiestan mediante tensiones.

Resistencia a la tensión en tiras anchas: D4595-86 (1994) Método particularmente apropiado para geotextiles no tejidos y para geotextiles tejidos con resistencia de aproximadamente 100 kN por metro de ancho. Prueba adecuada para determinar la resistencia real del material para diseño del refuerzo en muros de contención, terraplenes, taludes y otros casos donde se desea refuerzo a la tensión.

Elongación en tiras anchas: Relación idéntica a la indicada para el caso de la prueba "Grab", sólo que en la determinación de esta propiedad se conocen valores más cercanos a la realidad. Esta propiedad se reduce al incrementarse la presión de confinamiento sobre el geotextil.

Módulo de tensión: Es una de las propiedades más significativas para aplicaciones de refuerzo. Indica la capacidad de soporte que puede proporcionar el geotextil, así como, inversamente su capacidad de adaptarse a irregularidades del terreno donde se utiliza. Diversos métodos de diseño de caminos revestidos, terraplenes y sobrecarpetas reforzadas con geotextiles toman en cuenta esta propiedad.

Resistencia al reventamiento Mullen: Se puede utilizar para comparar el daño ocasionado a un geotextil durante su instalación. La prueba índice de esta propiedad es ampliamente utilizada en la industria del cartón.

Coefficiente de fricción suelo-geotextil: Existen diferentes métodos que son adaptaciones de la prueba de esfuerzo cortante empleada en geotecnia, modificada para fijar el geotextil al arreglo. Haliburton empleó un aparato, mismo que puede modificarse para colocar dos suelos representativos de la situación real que se desea modelar y, determinar la resistencia al deslizamiento por medio de la aplicación de una fuerza al textil para tratar de sacarlo de su lugar.

Esta propiedad es usada en el cálculo de muros de contención reforzados por cápsulas de geotextil, donde el material trabaja por fricción y en general, en las aplicaciones de refuerzo. Frecuentemente, con el resultado de esta prueba, comparado con las propiedades del suelo, se obtienen eficiencias en cohesión y ángulo de fricción, siendo los parámetros del suelo los límites máximos para el sistema suelo-geotextil.

Elongación a largo plazo con carga estática (flujo plástico): Propiedad muy importante para el caso de refuerzo. Ensayes preliminares con presión de confinamiento muestran un mejoramiento del desempeño para geotextiles entrelazados mecánicamente y termosellados, según lo indican McGown, Andrawes y Kabir, en una conferencia sobre geotextiles en las Vegas en 1982. Por este concepto es necesario considerar factores de seguridad adecuados al tipo de geotextil.

Propiedades hidráulicas

Permisividad (*Permittivity* Ψ): Se define como la cantidad de flujo volumétrico de agua por unidad de área, por unidad de carga hidráulica bajo condiciones de flujo laminar, en una dirección normal a través del geotextil. Se puede optar por el ensaye de carga constante o el de carga variable, en la primera opción se verifica que exista flujo laminar.

El método de carga constante se emplea en caso de flujos muy altos. Las determinaciones se efectúan midiendo el flujo a través del geotextil, calculando la permisividad, en la que se encuentra implícito el espesor del material.

Esta propiedad está directamente relacionada con la filtración, misma que se utiliza en las ecuaciones de diseño por función, tema que se tratará en el capítulo 5. Multiplicada por el espesor nominal del geotextil, se convierte en el coeficiente de permeabilidad k , el cual debe conservar cierta proporción con respecto del coeficiente de permeabilidad del suelo, para cumplir con la conocida condición de suficiente permeabilidad. Existen diversos criterios al respecto, siendo el más común el que requiere que k del geotextil sea mayor que k del suelo; existiendo otro criterio que asigna factores de corrección a k del geotextil, de acuerdo al riesgo correspondiente al tipo de sistema diseñado, ya sea el dren de una carretera, o presa, etcétera.

Porosidad: Como se define convencionalmente para suelos en la ingeniería geotécnica, la porosidad de un geotextil se define como la relación de volumen de vacíos con respecto del volumen total. Se relaciona con la habilidad del líquido de pasar a través del geotextil pero es rara su medición directa, en su lugar se calcula a partir de otras propiedades del geotextil

$$n = 1 - \frac{m}{\rho t}$$

donde n = porosidad
 m = masa por unidad de área
 ρ = densidad total del geotextil
 t = espesor del geotextil

La medición del tamaño de poro puede establecerse por el cribado cuidadoso de esferas de vidrio graduadas (véase AOS), con analizadores de imagen; o por la penetración de mercurio. Algunos geotextiles tienen poros muy sensibles a los cambios de espesor debidos a, por ejemplo, la aplicación de esfuerzos normales.

Porcentaje de área abierta: El porcentaje de área abierta (POA) es una propiedad del geotextil que sólo es aplicable a geotextiles tejidos, y principalmente para los geotextiles tejidos de tipo monofilamento. POA es una comparación del total de área abierta (espacios vacíos entre las fibras adyacentes) con respecto al área total de espécimen. Los geotextiles tejidos de tipo monofilamento varían de una estructura cerrada ($POA \cong 0$) a otra extremadamente abierta ($POA = 36\%$), donde la mayoría de los geotextiles comerciales varían de 6 a 12%.

Tamaño de abertura aparente (AOS): El AOS, también llamado tamaño de abertura equivalente (EOS del inglés), es el tamaño de la malla US Standard que corresponde a la fracción de esferas de vidrio que fueron retenidas en la misma, en un 95% o más. Se expresa como O_{95} , en cuyo caso el valor corresponde a la equivalencia en milímetros del tamaño o número de la malla. Esta propiedad tiene relación con la filtración de partículas de suelo por medio de la estructura del geotextil. Prácticamente todos los criterios de filtración hacen uso de esta variable.

Cabe señalar que esta prueba índice tiene los siguientes problemas:

- Para geotextiles entrelazados mecánicamente, las esferas de vidrio se quedan atrapadas, además de no modelar adecuadamente el cambio de la estructura filtrante con la presión.
- En las condiciones de la prueba, para algunas telas tejidas de cinta plana, las fibras se mueven, creando aberturas mayores a las reales.
- Las esferas de vidrio se llegan a romper con el uso, lo que origina resultados erróneos, por lo que requiere un cuidadoso manejo.
- No modela adecuadamente el comportamiento real en la situación de uso.

Relación de gradientes: Esta prueba se modela con las condiciones aplicables de suelo, carga hidráulica, geotextil y gradiente hidráulico de un proyecto específico. También puede usarse un material tipo en lugar del suelo, que sea fácil de obtener y mezclarlo con otro en el laboratorio. Esta propiedad modela el posible problema de oclusión total de los poros de un geotextil, con el correspondiente efecto del cese de flujo a través de él. Esta prueba ha sido modificada varias veces, a partir del desarrollo por el Cuerpo de Ingenieros de los EUA, luego Haliburton y posteriormente el Subcomité de Geotextiles D-35 de la ASTM.

El Cuerpo de Ingenieros indica que cuando la relación de gradiente es mayor a 3, es indicio de oclusión. La información más importante obtenida de esta prueba (Carroll 1985) ha sido la identificación de los factores que implican al combinarse el potencial taponamiento del geotextil; los factores son: altos gradientes hidráulicos, suelos con discontinuidades en su curva granulométrica (*gapgraded*) y suelos no cohesivos. De estos factores, se reconoce que el gradiente hidráulico es el que ocasiona un incremento en el potencial de oclusión de los geotextiles al combinarse con los tipos de suelos mencionados.

Propiedades de durabilidad

Resistencia al ataque químico: El método ASTM D-543 llamado "resistencia de los plásticos a los reactivos químicos", proporciona una lista de 50 reactivos estándar, los cuales se emplean para el ensaye químico de muestras de geotextil sometidas a ataque acelerado a altas temperaturas. Como resultado se reportan cambios en peso, dimensiones, apariencia y propiedades mecánicas.

El método EPA 9090, desarrollado inicialmente para el ensaye de geomembranas, se pretendía que fuera modificado durante los 90's para incluir la prueba de geotextiles, que serían empleados en sistemas de impermeabilización de presas de almacenamiento de desechos químicos peligrosos. Este método está diseñado para evaluar la compatibilidad química de los geosintéticos con los productos depositados en las presas.

Cabe señalar que el ataque químico puede acelerarse al incrementar la concentración del agente químico o al ensayar las muestras a temperaturas elevadas; actualmente no se conoce correlación alguna que permita extrapolar los resultados de una prueba acelerada al comportamiento en condiciones normales, por lo que este tipo de pruebas proporcionan sólo datos índices, cuya aproximación depende del grado en que las condiciones empleadas para acelerar los resultados no alteren el mecanismo de la reacción química entre el reactivo y el polímero.

Lo anterior, con base en que los productos orgánicos, tales como los polímeros, pueden seguir diferentes rutas de reacción química dependiendo de los agentes externos como la temperatura, presión, concentración, agitación mecánica, sustancias catalizadoras, etcétera.

Resistencia al ataque biológico: El método CGSB 4-GP-2, titulado "*Burial deterioration of fabrics*", elaborado por la División Química del Consejo Nacional de Investigación de Canadá, consiste en preparar muestras de geotextil de 12 x 12 cm, las cuales se entierran en el suelo, cada 3 meses se extraen especímenes y se ensayan por una variante del método de resistencia al reventamiento para geotextiles, utilizando el equipo Mullen.

Aún no existe un método normalizado para geotextiles, probablemente porque se sabe que las bacterias son selectivas en cuanto a las sustancias con que se alimentan, además los plásticos no han estado presentes en el suelo por un lapso tan grande como para que se hayan desarrollado microorganismos que se alimenten particularmente de ese tipo de sustancias. Por otra parte, la característica de imputrescibilidad de la mayoría de los plásticos es bien conocida, dada su permanencia en basureros a cielo abierto o tiraderos donde no se reciclan.

Resistencia a la temperatura: Cuando se somete al geotextil a temperaturas cercanas a su temperatura de ablandamiento, la orientación de las fibras puede perderse afectando en forma definitiva la resistencia mecánica del material. Por lo anterior, en aquellas aplicaciones tales como el refuerzo con geotextil de sobrecarpetas asfálticas, en la que el geotextil se impregna de material bituminoso a temperaturas elevadas, es conveniente que se considere mantener una diferencia de 20 °C entre la temperatura del producto caliente y la temperatura de ablandamiento del geotextil. El polipropileno se derrite a los 165 °C y el poliéster a los 250 °C.

Resistencia a la luz solar: Todos los plásticos presentan algún grado de sensibilidad a la luz ultravioleta, particularmente la de menor longitud de onda, la cual rompe los enlaces que mantienen unidas las cadenas del polímero, lo que origina un proceso de degradación. El polipropileno es muy sensible. Para reducir el efecto de degradación, durante el proceso de fabricación se agregan al polímero, sustancias protectoras como el pigmento llamado negro de humo o agentes absorbentes de la radiación.

La prueba utilizada para evaluar la degradación en geotextiles debida a la radiación solar, somete al textil a una fuente de radiación (Arco de Xenón) por períodos de 150, 300 y 500 horas, obteniéndose una curva de degradación, cuyos resultados son relativos de la resistencia del geotextil; ya que en condiciones reales, la degradación depende de muchos factores como la ubicación geográfica, época del año, temperatura, humedad, cantidad de nubes presentes, viento, etcétera.

3.5 Métodos de prueba aceptados por la industria

Los métodos y procedimientos estándares de pruebas son muy importantes para asegurar que la comparación de las propiedades físicas del material entre el que especifica y el usuario sea veraz.

La Sociedad Americana para Ensayos de Materiales (ASTM del inglés) inició el Comité D35 de Geotextiles, Geomembranas y Productos Relacionados para estandarizar los métodos de prueba específicos para geosintéticos. El trabajo realizado por el director y los miembros del subcomité dio como resultado la estandarización de un número de métodos de prueba. Cabe señalar que ningún método por sí solo proporciona toda la información necesaria para todas las aplicaciones de diseño, por lo que deberá complementarse la información usando otros métodos de prueba. Las especificaciones de propiedades geosintéticas más usadas para geotextiles se indican a continuación:

Especificaciones:

D4886-88 (1995) ^{ET}	Resistencia de los geotextiles a la abrasión (Método de papel lija/bloque deslizante)
D4355-92	Deterioro de los geotextiles debido a su exposición a la luz ultravioleta y al agua (Aparato Xenon-Arco)
D4594-96	Efectos de la temperatura en la estabilidad de los geotextiles
D5322-98	Procedimientos de inmersión para la evaluación de la resistencia química de los geotextiles a líquidos
D4632-86 (1996)	Carga de rotura y elongación de geotextiles (Método Grab - resistencia a la tensión)
D4833-88 (1996) ^{ET}	Índice de la resistencia a la perforación (o punzonamiento) de geotextiles, geomembranas y productos relacionados
D4884-96	Resistencia de la costura en geotextiles cosidos
D4595-86 (1994)	Propiedades de tensión de los geotextiles mediante el método de tira ancha (resistencia y elongación a la tensión)
D4533-91 (1996)	Resistencia al desgarre trapezoidal de los geotextiles
D3786	Resistencia al reventamiento o estallamiento "Mullen Burst"
D4491	Permisividad, flujo de Agua y permeabilidad Normal

Prácticas:

D5818-95	Obtención de muestras de geotextiles de una sección de la prueba para la estimación del daño por la instalación
D4354-96	Muestreo de los geosintéticos para pruebas
D4759-88 (1996)	Determinación de las especificaciones de conformidad de los geosintéticos

Métodos de prueba:

D1987-95	Colmatación biológica de los geotextiles o de los rellenos suelo/geotextil
D5970-96	Deterioro de los geotextiles debido a su exposición a la intemperie
D5596-94	Evaluación microscópica de la dispersión de carbón negro en geosintéticos de poliolefina
D5262-97	Evaluación del comportamiento de la fluencia de los geosintéticos bajo tensión no confinada
D5496-98	Prueba de inmersión de geotextiles en el lugar
D5261-92 (1996)	Medición de la masa por unidad de área de geotextiles (peso nominal)

D-6241-98	Resistencia a la perforación estática de geotextiles y productos relacionados usando un pistón de 50mm
D4751-95	Determinación de la abertura aparente de poros de un geotextil (AOS)
D-6140-97	Retención de asfalto de telas de pavimentación usadas en pavimentación asfáltica para aplicaciones de ancho total
D5321-92 (1997)	Determinación del coeficiente del suelo y del geosintético, o geosintético y la fricción del geosintético mediante el método directo de esfuerzo cortante
D4716-95	Transmisividad hidráulica de carga constante (flujo planar) de geotextiles y productos relacionados
D5141-96	Determinación de la eficiencia de la filtración y velocidad de flujo de un geotextil para aplicaciones de cortinas de retención de sedimentos usando especificaciones del lugar
D5567-94	Prueba de relación de conductividad hidráulica (HCR del inglés) del sistema suelo-geotextil
D-5199-98	Medición del espesor nominal de geotextiles y geomembranas
D-5101-96	Medición del potencial de colmatación del sistema suelo-geotextil (mediante la relación del gradiente)

Guías:

D5819-98	Métodos de ensayos para la evaluación experimental de la durabilidad de los geosintéticos
D4873-97	Identificación, almacenamiento y manejo de los geotextiles

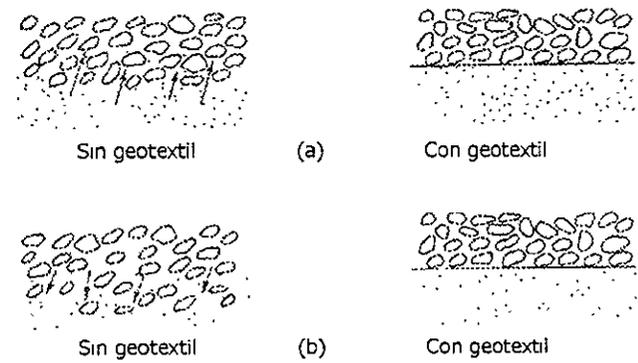
3.6 Aplicaciones

Según Koerner (1994), las aplicaciones de los geotextiles se pueden clasificar en cinco categorías:

3.6.1 Separación

El concepto de separación puede ilustrarse con el siguiente adagio de ingeniería: "10 libras de roca colocadas sobre 10 libras de lodo se convierten en 20 libras de lodo".

La definición de geotextil de separación es la introducción de un textil flexible y poroso colocado entre dos materiales (suelos) diferentes, de forma que la integridad y funcionalidad de ambos materiales resulten intactas o mejoradas.



Quando se coloca un agregado granular sobre un suelo fino, existen dos mecanismos que tienden a ocurrir con el tiempo:

- a) el suelo fino intenta penetrar en los espacios vacíos del agregado granular, arruinando su capacidad de drenaje; y
- b) el suelo granular trata de introducirse en el suelo fino, destruyendo así la basta resistencia del suelo.

Figura 3.10 Diferentes mecanismos involucrados en la función de separación.

El geotextil establece una frontera permeable entre diferentes masas de suelo o roca y segrega de este modo dos o más tamaños de partículas.

Así, se preserva la resistencia y la permeabilidad de los agregados y otro tipo de materiales selectos, lo que previene su contaminación con suelos cohesivos.

Las aplicaciones típicas son en la construcción de caminos, terraplenes, etcétera, así como en los procedimientos correctivos de vías de ferrocarril que presentan desniveles y asentamientos por contaminación del balasto.

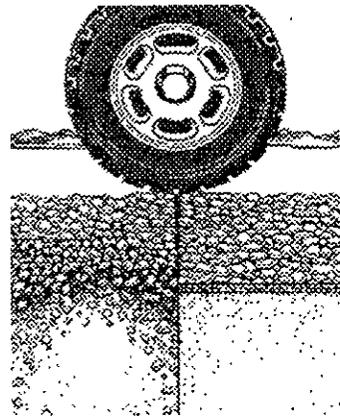


Figura 3.11 Función separación

3.6.2 Refuerzo

Los geotextiles poseen buena resistencia a la tensión, por lo que pueden complementar sin problema a aquellos materiales buenos en compresión, pero débiles en tensión. Así, suelos de baja resistencia como limos y arcillas son ideales para el refuerzo con geotextiles.

El geotextil imparte resistencia a la tensión a un sistema suelo-geotextil, incrementando la estabilidad estructural. El incremento en la resistencia puede evaluarse de diferentes maneras.

Las pruebas triaxiales dirigidas por Broms, ilustran los efectos benéficos del geotextil cuando se coloca adecuadamente; de lo contrario no habrá beneficio alguno.

Quando el geotextil se coloca en el centro o en los tercios de la muestra de suelo, los efectos benéficos son fácilmente visibles. Véase figura 3.13

El geotextil interrumpe las potenciales zonas de corte e incrementa la resistencia de todo el sistema suelo-geotextil.

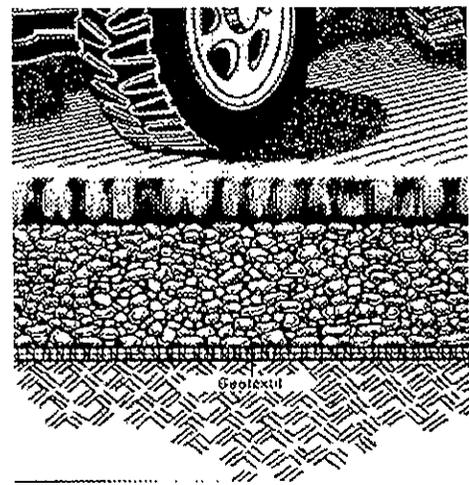
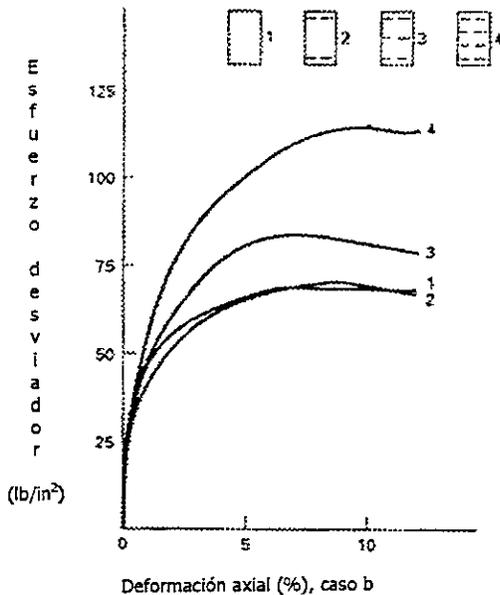
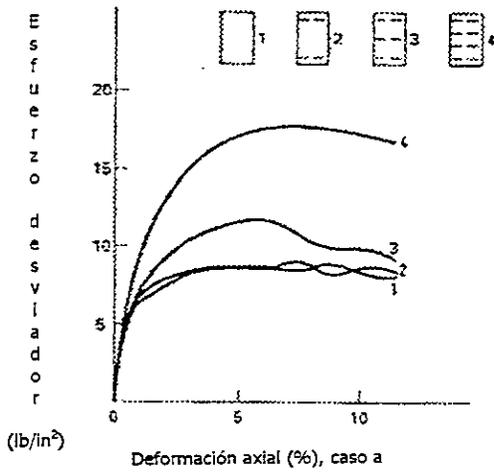


Figura 3.12 Función de refuerzo



Como es de esperarse, la colocación de capas de geotextil colocadas a los tercios son más benéficas que la colocación de una capa de geotextil en el centro de la muestra.

Algunos ejemplos son los refuerzos de terraplenes construidos sobre suelos inestables, la construcción de muros de contención mediante encapsulados de suelo, el desplante de taludes con mayores ángulos de inclinación, etcétera.

Dentro de la función general de refuerzo de suelos con geotextil, existen tres mecanismos diferentes: el tipo membrana, el tipo cortante y el tipo anclaje.

Figura 3.13 Resultados de pruebas triaxiales mostrando la influencia de los geotextiles colocados a diferentes distancias dentro de la muestra de suelo, por Broms. a) Arena compacta confinada a una presión de 3 lb/in² (21 kPa). b) Arena compacta confinada a una presión de 30 lb/in² (210 kPa).

Tipo membrana

El refuerzo de membrana ocurre cuando una carga vertical es aplicada al geotextil sobre un suelo deformable. Dependiendo de la profundidad a la que el geotextil es colocado con respecto de la carga, se establece que:

$$\sigma_h = \frac{P}{2\pi z^2} \left[3 \operatorname{sen}^2 \theta \cos^3 \theta - \frac{(1 - 2\mu) \cos^2 \theta}{1 + \cos \theta} \right]$$

- donde
- σ_h = esfuerzo horizontal a la profundidad z y ángulo θ
 - P = carga vertical aplicada
 - z = profundidad debajo de la superficie donde σ_h está siendo calculado
 - μ = relación de Poisson
 - θ = ángulo de la vertical debajo de la superficie de carga P

Nótese que cuando $\theta = 0^\circ$,

$$\sigma_h = \frac{P}{\pi z^2} \left[\frac{1}{2} - \mu \right]$$

Cuando μ es menor que 0.5, σ_h es negativo, lo cual es tensión; es decir, la carga vertical aplicada descendente produce tensión en un plano horizontal debajo de ella. La tensión es tomada por el geotextil, motivo por el cual fue colocado ahí. Mientras más cercano esté el geotextil de la carga, (bajos valores de z), mayor será la tensión sufrida por aquel.

Tipo cortante

Se puede visualizar el refuerzo de este tipo, al analizar las pruebas de esfuerzo cortante. Un geotextil colocado sobre el suelo es cargado en dirección normal, y dos materiales son cortados en su interfase.

Los parámetros resultantes de la resistencia al corte (adhesión y ángulo de fricción suelo-geotextil) pueden obtenerse de forma tradicional en geotecnia, usando un criterio de falla adaptado de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c_a + \sigma'_n \tan \delta$$

donde τ = resistencia al corte entre el geotextil y el suelo
 σ'_n = tensión normal efectiva en el plano de corte
 c_a = adhesión del geotextil al suelo
 δ = ángulo de fricción entre el geotextil y el suelo

Los parámetros de resistencia al corte y pueden compararse con los parámetros de resistencia al corte del suelo por sí mismos (ej. suelo contra suelo) como sigue:

$$\tau = c + \sigma'_n \tan \Phi$$

donde c = cohesión de suelo a suelo
 θ = ángulo de fricción de suelo a suelo

$$E_c = \left(\frac{c_a}{c} \right) \times 100$$

$$E_\phi = \left(\frac{\tan \delta}{\tan \Phi} \right) \times 100$$

donde E_c = eficiencia de la movilización de la cohesión
 E_ϕ = eficiencia de la movilización del ángulo de fricción

Estas relaciones, comúnmente llamadas eficiencias, tienen valores límite de cero a uno. Un valor mayor que la unidad no es posible, ya que el plano de falla estaría moviéndose dentro del suelo mismo.

Tipo Anclaje

El refuerzo de anclaje es similar al de tipo cortante antes citado, pero ahora el suelo actúa en ambos lados del geotextil como una fuerza de tensión que tiende a retirarlo del suelo. El modelo de laboratorio de este mecanismo es similar al de corte directo, excepto que el suelo está inmóvil en ambas mitades del aparato de prueba y el geotextil se extiende de fuera del aparato hacia el centro.

El geotextil es asido externamente y tensionado (tirado), mientras fuerzas normales actúan sobre el suelo y el geotextil dentro del aparato de prueba.

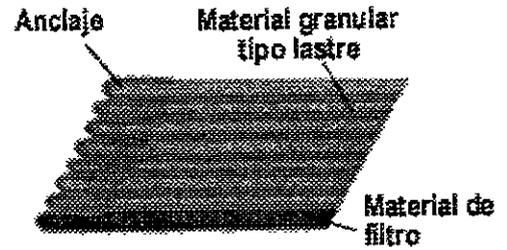
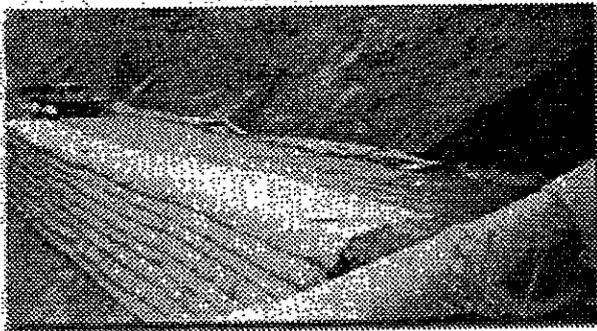


Figura 3.14 Función de refuerzo tipo anclaje. Construcción y restitución de rellenos, capacidad de producir distintos pesos y espesores según las necesidades de cada obra.

Otra aproximación podría ser expresar la eficiencia como función de la cantidad de resistencia movilizada del textil. La tensión a lo ancho y largo deben considerarse en este caso. Eficiencias mayores a la unidad pueden fácilmente ocurrir. Este tipo de mecanismo es muy utilizado.

Para el cálculo, se usará la resistencia de corte movilizada para el geotextil con el suelo arriba y con el suelo debajo, aritméticamente se sumaran los dos valores y se tomarán como el valor límite de anclaje. En ausencia de pruebas de anclaje, se utilizarán los valores directos de corte generados para este fin.

3.6.3 Filtración

Se define como el sistema en equilibrio geotextil-suelo que permite el libre flujo de líquido (o agua), con pérdida de suelo limitada, a través del plano del geotextil durante un tiempo de servicio compatible con la aplicación en consideración; es decir, que el geotextil sirve para la retención de suelo en su cara superior.

Ambas, una adecuada permeabilidad que necesita una estructura abierta del textil y la retención de suelo que requiere un producto de estructura apretada, son requeridas simultáneamente. Un tercer factor involucrado es la compatibilidad del flujo a largo plazo, a través del suelo-geotextil, donde se cuidará que el geotextil no será obstruído (fenómeno de taponamiento) excesivamente durante la vida útil del sistema.

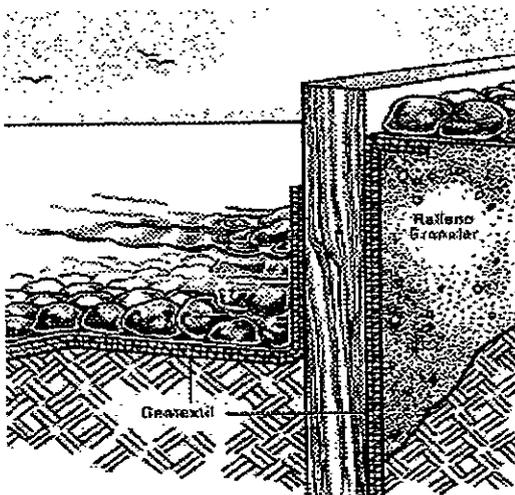


Figura 3.15 Función de filtración

La filtración es una de las funciones principales para la industria de geotextiles; ya que cuando son diseñados y construidos apropiadamente, ofrecen un remedio práctico a muchos problemas que involucran el flujo de líquidos.

Ejemplos de aplicaciones son: la construcción de subdrenes de carreteras o aeropistas, en combinación con estructuras pesadas como gaviones y enrocamientos para evitar la erosión de taludes y cortes, la contención de rellenos hidráulicos, etcétera.

Permeabilidad

La discusión de la permeabilidad del geotextil se refiere a la permeabilidad del plano transversal cuando el flujo líquido es perpendicular al plano del textil. Algunos de los geotextiles usados para este propósito son relativamente gruesos y compresibles. Por esta razón, el espesor está incluido en el coeficiente de permeabilidad y es usado como permisividad, la cual se define como:

$$\psi = \frac{k_n}{t}$$

donde ψ = permisividad
 k_n = coeficiente de permeabilidad en el plano transversal
 t = espesor a presión normal específica

Las pruebas de permisividad para el geotextil siguen los lineamientos utilizados en las pruebas de permeabilidad para suelo. Algunos diseñadores prefieren trabajar directamente con la permeabilidad, requiriendo esta propiedad del geotextil.

Retención de suelo

Para permitir un flujo mayor de líquido a través del geotextil, los espacios vacíos en él deberán ser más largos. Como quiera que sea, hay un límite, es cuando las partículas de suelo en la cara superior del geotextil comienzan a pasar a través de los espacios del geotextil junto con el fluido. Esto puede acarrear una situación indeseable llamada tubificación, en la cual las partículas más finas de suelo son transportadas a través del geotextil, dejando más espacios vacíos de suelo detrás. Entonces, la velocidad del fluido se incrementa, acelerando el proceso, hasta que la estructura del suelo comienza a colapsarse. Este colapso conlleva a cronometrar los patrones de hoyos que crecen con el tiempo.

Este proceso de tubificación puede prevenirse al fabricar geotextiles con espacios pequeños en su estructura, capaces de retener el suelo que se encuentra encima de él. Esa fracción de suelo que debe retenerse es la que servirá como parámetro de diseño. Estas partículas de suelo eventualmente bloquearán el paso de otras más finas, construyendo por encima (aguas arriba) una estructura de suelo estable. Afortunadamente, los conceptos de filtración están bien establecidos para el diseño de filtros de suelo, por lo que pueden extrapolarse al diseño de filtros con geotextiles.

Existen muchas aproximaciones para llevar a cabo el diseño de retención de suelo, en su mayoría utilizan las características del tamaño de las partículas de suelo y las comparan con el 95% del tamaño de abertura del geotextil (definido como O_{95} del geotextil). El método de prueba utilizado en Estados Unidos para determinar este valor, se llama tamaño de abertura aparente (AOS del inglés). En Canadá y Europa, el método de prueba es llamado tamaño de abertura de filtración (FOS del inglés) y se complementa con cribados hidrodinámicos.

El más simple de los métodos de diseño examina el porcentaje de suelo que atraviesa la malla #200, cuyas aberturas son de 0.074mm. De acuerdo al criterio del Grupo de Trabajo 25 (Task Force #25), se recomienda lo siguiente:

- Para suelos cuyo contenido de partículas que pasan la malla #200 es menor o igual al 50%, el filtro del geotextil debe cumplir que: $AOS \geq$ malla #30 (0.6 mm). $O_{95} < 0.59$ mm.
- Para suelos cuyo contenido de partículas que pasan la malla #200 es mayor al 50%, el filtro del geotextil debe cumplir que: $AOS \geq$ malla #50 (0.3 mm). $O_{95} < 0.30$ mm.

A principios de 1972, una serie de comparaciones directas del tamaño de abertura aparente de geotextil (O_{95} , O_{50} , ó O_{15}) fueron hechas con respecto a la relación de retención de algunas partículas de suelo (d_{90} , d_{85} , d_{50} ó d_{15}).

El valor numérico de la relación depende del tipo de geotextil, tipo de suelo, régimen de flujo, etcétera. Por ejemplo, Carroll recomienda:

$$O_{95} < (2 \text{ ó } 3) d_{85}$$

en donde d_{85} es el tamaño de partícula de suelo en milímetros para la cual el 85% del total son finos.

Tabla 3.4 Criterios de retención de suelos en geotextiles. (Koerner 1994)

Fuente	Criterio	Notas
Grupo de trabajo #25 (1986)	$50\% \leq 0.074 \text{ mm}$, $O_{95} < 0.59 \text{ mm}$ $50\% > 0.074 \text{ mm}$, $O_{95} < 0.30 \text{ mm}$	Ninguna restricción en cuanto al tipo de geotextil o suelo
Calhoun (1972)	$O_{95}/d_{95} \leq 1$	Geotextiles tejidos, suelos con $\leq 50\%$ pasa malla #200
Zitscher (1975)	$O_{95} \leq 0.2 \text{ mm}$ $O_{50}/d_{50} \leq 1.7 \text{ a } 2.7$	Geotextiles tejidos, suelos cohesivos Geotextiles tejidos, suelos con $CU \leq 2$, $d_{50} = 0.1 \text{ a } 0.2 \text{ mm}$
Ogink (1975)	$O_{50}/d_{50} \leq 2.5 \text{ a } 3.7$ $O_{50}/d_{50} \leq 1$ $O_{50}/d_{50} \leq 1.8$	Geotextiles no tejidos, suelos cohesivos Geotextiles tejidos Geotextiles no tejidos
Sweetland (1977)	$O_{15}/d_{85} \leq 1$ $O_{15}/d_{15} \leq 1$	Geotextiles no tejidos, suelos con $CU = 1.5$ Geotextiles no tejidos, suelos con $CU = 4.0$
Rankilor (1981)	$O_{50}/d_{85} \leq 1$ $O_{15}/d_{15} \leq 1$	Geotextiles no tejidos, suelos con $0.2 \leq d_{85} \leq 0.25 \text{ mm}$ Geotextiles no tejidos, suelos con $d_{85} > 0.25 \text{ mm}$
Schober & Teindl (1979)	$O_{50}/d_{50} \leq 2.5 \text{ a } 4.5$ $O_{50}/d_{50} \leq 4.5 \text{ a } 7.5$	Geotextiles tejidos y no tejidos (delgados), dependiendo de CU Geotextiles delgados no tejidos, dependiendo de CU , suelos limosos y arenosos.
Giroud (1982)	$O_{95}/d_{50} \leq (9-18)/CU$	Depende del suelo, CU y densidad
Carroll (1983)	$O_{95}/d_{85} \leq 2 \text{ a } 3$ $O_{95}/d_{85} \leq 1 \text{ a } 2$	Geotextiles tejidos y no tejidos Depende del tipo de suelo y CU
Christopher y Holtz (1985)	$O_{95}/d_{15} \leq 1$ ó $O_{50}/d_{85} \leq 0.5$	Flujo dinámico, agitado y cíclico, si el suelo se mueve debajo del geotextil
Comité Francés de Geotextiles y Geomembranas (1986)	$O_f/d_{85} \leq 0.38 \text{ a } 1.25$	Depende del tipo de suelo, compactación, propiedades hidráulicas y condiciones de aplicación
Fischer et al. (1990)	$O_{50}/d_{85} \leq 0.8$ $O_{50}/d_{15} \leq 1.8 \text{ a } 7.0$ $O_{50}/d_{50} \leq 0.8 \text{ a } 2.0$	Basado en la distribución del tamaño de poro del geotextil, y dependiente de CU del suelo

O_g = Tamaño de la abertura del geotextil correspondiente a X tamaño de partícula con base en el cribado de esferas de vidrio.

O_f = Tamaño de la abertura de filtración con base en cribado hidrodinámico.

d_y = Tamaño de la partícula de suelo correspondiente al y porcentaje pasado cribado.

CU = Coeficiente de uniformidad igual a d_{60}/d_{10} .

Compatibilidad de flujo a largo plazo

Quizás lo más preguntado en el uso de geotextiles relacionados con sistemas hidráulicos es: ¿Se obstruirá, atascará o taponará el geotextil?. Obviamente, algunas partículas de suelo se incrustarán en ellas mismas sobre o dentro de la estructura del geotextil, y una comprensible reducción en la permeabilidad o permisividad ocurrirá.

Este tipo de obstrucción parcial puede y debe ser esperada. Pero la pregunta real es si se obstruirá excesivamente, es decir, si se taponará la estructura del geotextil de tal forma que, el paso del flujo líquido disminuya hasta el punto en que el sistema no responda adecuadamente para tal función.

La respuesta está en probar una muestra de suelo y el geotextil en cuestión directamente en el laboratorio. Se observará que en la prueba de relación de gradiente (GR) $GR \leq 3.0$; en la prueba de flujo a largo plazo (LTF del inglés: *long-term flow*), la pendiente final de la curva del flujo contra tiempo es adecuada para las condiciones específicas del sitio de aplicación; o que en la prueba de la relación de conductividad hidráulica (HCR del inglés), HCR tenga valores entre 0.7 y 0.3.

Una alternativa diferente con respecto al taponamiento es simplemente evitar situaciones que se sabe conllevan a problemas de obstrucción excesiva. Se ha probado que las condiciones siguientes provocan preocupación en aplicaciones de geotextiles como filtro:

- Suelos poco cohesivos que consisten en distribuciones de partículas de suelo y espacios graduados, sujetos a altos gradientes hidráulicos.
- Alta alcalinidad del agua subterránea cuando el lento movimiento del flujo a través del geotextil puede formar precipitados de calcio, sodio o magnesio que se depositan en el mismo.
- Alto contenido de sólidos suspendidos en el líquido que se permea (como agua turbia en los ríos) lo que puede establecerse sobre o dentro del geotextil.
- Alto contenido de sólidos suspendidos junto con un alto contenido de microorganismos, como las lechadas de relleno, los cuales pueden establecerse sobre o dentro del geotextil, o ambos casos.

Para estos casos, puede usarse un geotextil relativamente abierto, que permita la sedimentación de partículas finas, o que los microorganismos pasen a través del geotextil para drenarse aguas abajo.

En tales casos, generalmente se consideran:

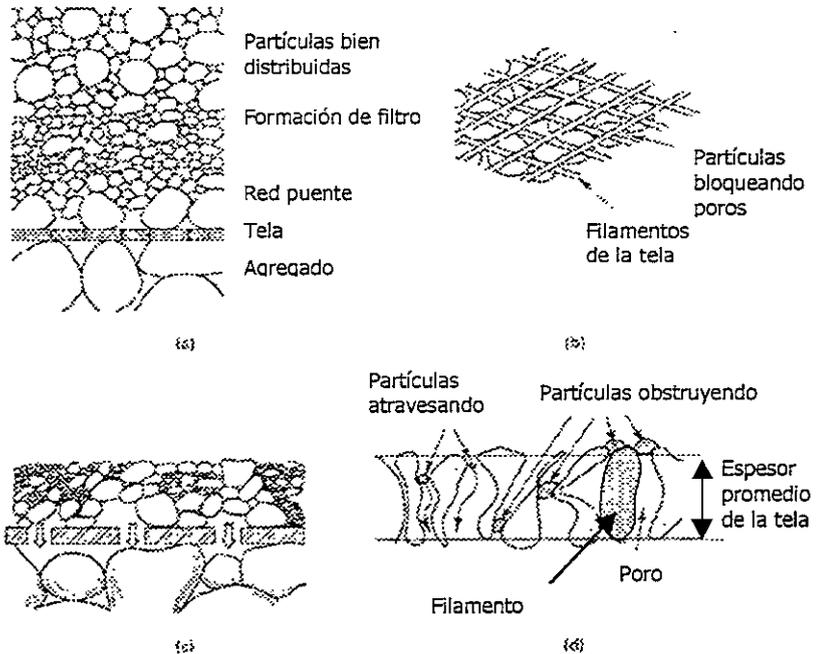
- Geotextiles tejidos con área abierta $\leq 8\%$, o
- Geotextiles no tejidos con porosidad $\geq 50\%$ (bajo condiciones específicas de esfuerzo normal en el sitio).

Debe reconocerse que el drenaje aguas abajo (ya sea grava, material polimérico, tubo perforado, etcétera) debe diseñarse para aceptar y transportar la materia particular sin excesivo taponamiento u obstrucción.

La discusión de la compatibilidad del suelo-geotextil supone el establecimiento de una serie de mecanismos, los cuales están en equilibrio con el régimen de flujo que será impuesto al sistema.

Figura 3.16 Mecanismos hipotéticos de la compatibilidad de flujo a largo plazo del sistema suelo-geotextil, por McGown.

- a) Formación de un filtro de suelo aguas arriba.
- b) Partículas aguas arriba bloqueando los poros del geotextil.
- c) Partículas aguas arriba forzando su paso por las aberturas del geotextil.
- d) Partículas de suelo obstruyendo dentro de la estructura del geotextil.



3.6.4 Drenaje

Es el sistema en equilibrio suelo-geotextil, que permite el libre flujo del agua con pérdida de suelo limitada, en el plano del geotextil durante un tiempo de servicio compatible con la aplicación en consideración.

Todos los geotextiles pueden tener esta función, pero en diferentes grados; por ejemplo, un geotextil tejido delgado puede transmitir agua a través de él en un grado moderado. Al contrario, un geotextil grueso no tejido punzonado tiene un alto contenido de vacíos en su estructura, y estos espacios son capaces de transmitir el líquido. Sin embargo, existen otros geosintéticos como las georredes y geocompuestos, los cuales pueden transmitir mayor cantidad de líquido que los geotextiles aunque sean gruesos o voluminosos. Obviamente, el diseño definirá que tipo de geosintético deberá usarse en cada caso.



Figura 3.17 Empleo de geotextiles en trincheras drenantes

La discusión sobre el tema de drenaje, converge considerablemente con el tema de filtración. De hecho, excepto por la consideración de la dirección de flujo, los conceptos de retención de suelo y compatibilidad de flujo a largo plazo para estas funciones son los mismos.

Permeabilidad

Refiriéndose al plano de permeabilidad para la función de drenaje, debemos considerar que el espesor del geotextil disminuirá con el incremento del esfuerzo normal sobre él. Por tal razón se define el término de transmisividad como sigue:

$$\theta = k_p t$$

donde θ = transmisividad
 k_p = coeficiente de permeabilidad en el plano
 t = espesor bajo presión normal específica

Aplicaciones típicas son: drenes de chimenea en presas, drenes atrás de muros de contención, capas rompedoras de capilaridad, etcétera.

Esta aplicación es privativa de los geotextiles fabricados por entrelazamiento mecánico, que por su elaboración y espesor presentan también una componente de permeabilidad en su plano.

En los últimos años, con la aparición de los geocompuestos para drenaje, esta aplicación ha ido cayendo en desuso para los geotextiles.

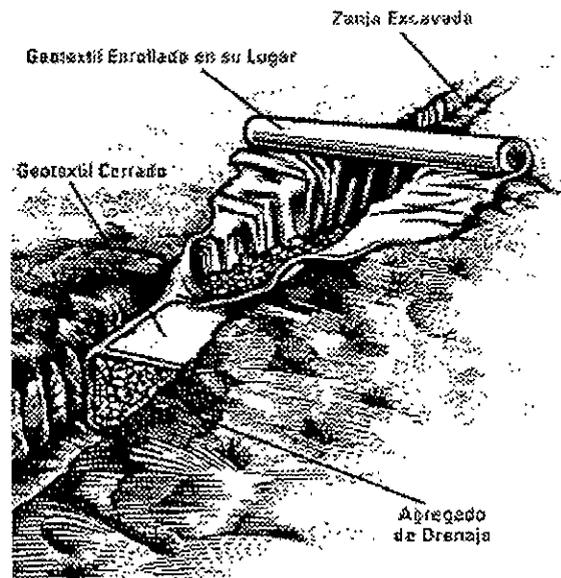


Figura 3.18 Función de drenaje

3.6.5 Barrera de líquidos (control de la permeabilidad)

Una barrera líquida puede crearse dotando al geotextil de relativa impermeabilidad en ambos planos de su estructura. Se refiere a la aplicación de geomembranas elaboradas en el lugar (de estructura fibrosa en lugar de un lienzo continuo de polímero), que consisten en geotextiles impregnados generalmente con productos asfálticos o bituminosos para reducir su permeabilidad.

La permeabilidad a la que se hace referencia, obviamente no es cero (ningún geosintético tiene permeabilidad cero), pero es muy baja comparada con la del geotextil original. Esta permeabilidad puede variar entre 2×10^{-6} a 2×10^{-8} ft/min (1×10^{-6} a 1×10^{-8} cm/s).

Estos rangos son comparables al coeficiente de permeabilidad de muchos suelos finos arcillosos.

Dentro de esta función de barrera de líquidos, obviamente se tiene el impedimento del flujo líquido o vapor.

Algunas aplicaciones son: el aislamiento o encapsulamiento de suelos expansivos, la impermeabilización de pavimentos antes de colocar sobrecarpetas asfálticas, la elaboración de formas flexibles impermeables, etcétera.

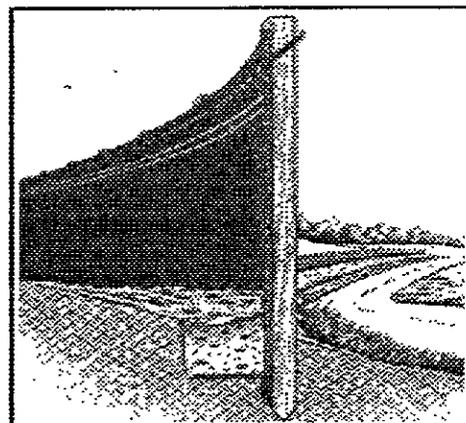


Figura 3.19 Función barrera de líquidos

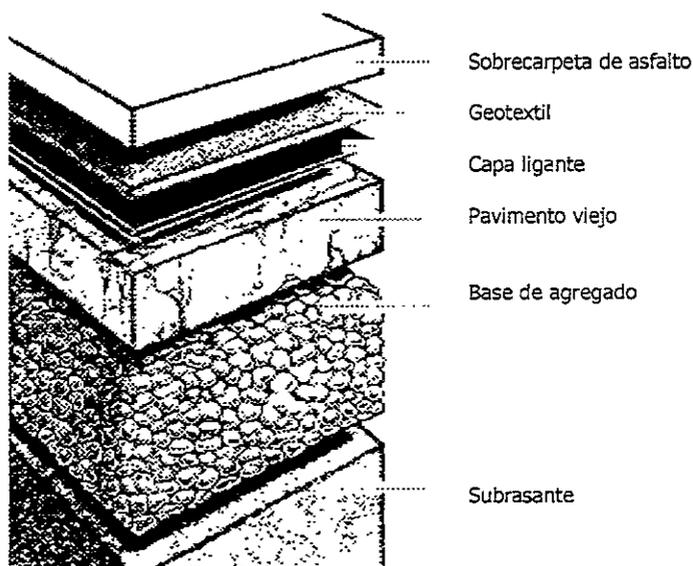


Figura 3.20 Reasfaltado usando geotextil

A continuación se presenta una lista concentrada de aplicaciones de los geotextiles, incluyendo las funciones principales y secundarias de éstos.

Tabla 3.4 Aplicaciones de los geotextiles

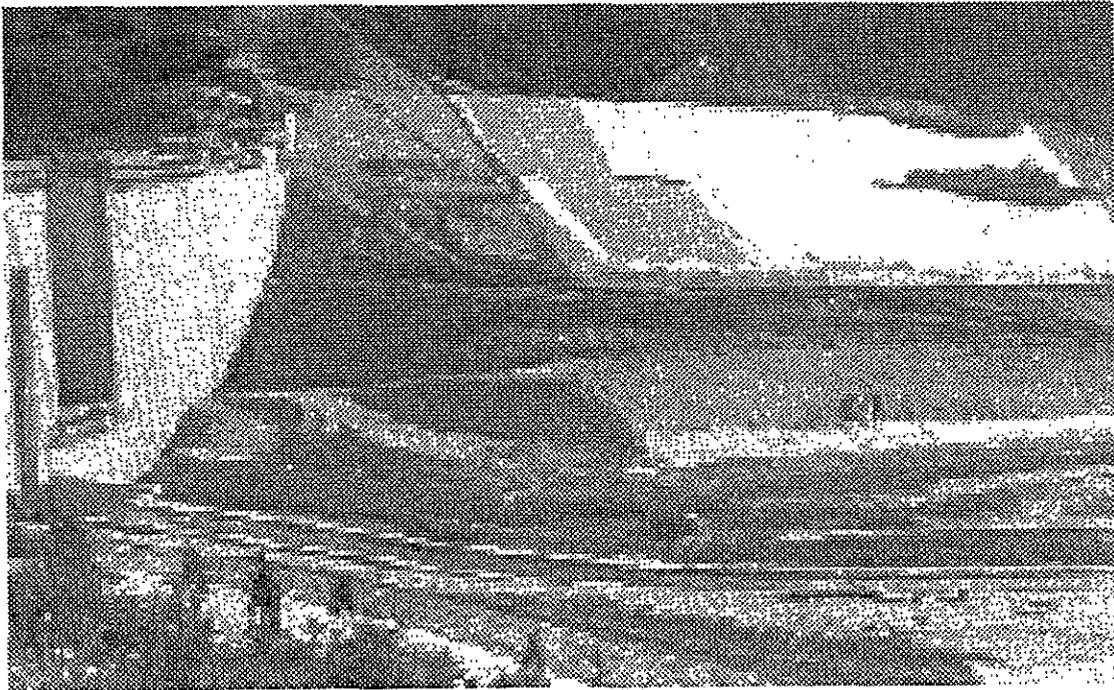
Aplicación	Función principal y secundaria	Productos
Estabilización de la subrasante	<i>Separación</i> / Refuerzo-filtro	Geotextil/ geomalla
Carreteras no pavimentadas (temporales y permanentes)	<i>Separación</i> / Filtro-drenaje-refuerzo	Geotextil
Carretera pavimentadas (secundarias y primarias) Campos deportivos	<i>Separación</i> / Filtro-drenaje	Geotextil
Coberturas de rellenos Precarga (estabilización)	<i>Separación</i> / Refuerzo-drenaje	Geotextil

Continuación de la tabla 3.4...

Aplicación	Función principal y secundaria	Productos
Construcción de carreteras de acceso Plataformas de trabajo Canales de navegación Areas generales en relleno Instalaciones de parqueo Protección costera y de ríos Corrales para ganado Construcción nueva y rehabilitación de ferrocarriles	<i>Separación/</i> Filtro-drenaje-refuerzo	Geotextil y en algunos casos en combinación con otros geosintéticos
Estabilización de la vía del ferrocarril	<i>Drenaje/</i> Separación-filtro	Geotextil
Muros de contención Drenes verticales	<i>Drenaje-Transmisión/</i> Separación-filtro	Geotextil
Drenes horizontales Bajo membranas (drenaje de gas y agua)	<i>Drenaje-Transmisión/</i> Refuerzo	Geotextil
Presas de tierra	<i>Drenaje-Transmisión/</i> Filtro	Geotextil
Bajo concreto (pisos y losas)	<i>Drenaje-Transmisión</i>	Geotextil
Refuerzo de suelo en - Terraplenes - Taludes - Muros verticales	<i>Refuerzo</i> <i>Refuerzo</i> <i>Refuerzo</i>	Geotextil/ Geomalla Geomalla/ Geotextil Geomalla/ Geotextil
Capas de refuerzo de pavimentos flexibles y de concreto	<i>Refuerzo</i>	Geotextil
Refuerzo de membranas	<i>Refuerzo</i>	Geotextil
Sacos de arena	<i>Refuerzo</i>	Geotextil
Estribos de puentes	<i>Refuerzo</i>	Geotextil
Encapsulamiento de suelos	<i>Refuerzo/</i> Drenaje-filtro-separación	Geotextil
Soporte de membranas	<i>Refuerzo/</i> Separación-drenaje-filtro	Geotextil
Refuerzo de la subbase en carreteras y ferrocarriles	<i>Refuerzo/</i> Filtro	Geotextil
Sistemas y estructura de contención Refuerzo de terraplenes Refuerzo de rellenos Soporte de cimentaciones Red contra caídas de rocas	<i>Refuerzo/</i> Drenaje	Geotextil

Continuación de la tabla 3.4...

Aplicación	<i>Función principal y secundaria</i>	Productos
Redistribución de carga Apoyo de áreas de suelos blandos no uniformes Rellenos hidráulicos encapsulados	<i>Refuerzo</i> /Separación	Geotextil
Filtros invertidos para control de erosión: - Colocación de semillas - Bajo gaviones - Revestimiento de trincheras - Protección de terraplenes costeros - Protección de terraplenes en ríos, quebradas y lagos	<i>Filtro</i>	Geotextil
Terraplenes altos	<i>Filtro</i> / Drenaje	Geotextil
Mallas contra lodos Descarga de alcantarillas Drenes verticales	<i>Filtro</i> / Separación	Geotextil
Drenes en trinchera Envoltura de tubos Drenaje de capas de base Drenes estructurales Drenes de patá en presas Barreras de sedimentación	<i>Filtro</i> / Separación-drenaje	Geotextil
Drenaje subterráneo	<i>Filtro</i> / Transmisión de fluidos	Compuestos de drenaje prefabricados
Control de sedimentación con cortinas de retención	<i>Retención de sedimentos</i> / Filtración-separación	Geotextil
Carpeta asfáltica	<i>Impermeabilización</i> / Capa disipadora de esfuerzos	Geotextil
Protección de geomembrana	<i>Protección</i> / Amortiguación	Geotextil



4. GEOMEMBRANAS

4. GEOMEMBRANAS

4.1 Antecedentes

Desde tiempos inmemoriales el hombre ha usado su ingenio para conducir y almacenar el agua que requiere para su uso diario, agricultura, ganadería, etcétera. Muchas y distintas soluciones se le han dado al problema.

Los materiales impermeabilizantes utilizados tradicionalmente en la construcción provienen de la naturaleza o de los procesos finales de refinación de otras industrias (asfaltos y breas). La necesidad de mantener costos accesibles en la construcción moderna, ha obligado la evolución de diferentes materiales y métodos de impermeabilización.

En 1937 surgió el elastómero conocido como hule butilo, creado a partir del isobutileno y el isopreno; cuyas propiedades eran completamente diferentes a cualquier otro material sintético o natural. Resiste el envejecimiento producido por calor, luz solar y ozono; tiene excelente impermeabilidad a los gases, de hecho es el material más impermeable a líquidos y gases; tiene gran flexibilidad y elasticidad a una amplia gama de temperaturas y es prácticamente inerte al ataque químico. Se comercializó durante los años 40's y después se utilizó como membrana para techados y cisternas; el material demostró que ni el ardiente sol, ni los ciclos de frío y deshielo, así como el contacto con el agua y tierra, deterioraban las membranas. El hule butilo encontró su mayor uso como recubrimiento interior de tubos y de llantas sin cámara. La primer geomembrana como tal, fue de hule butilo y se utilizó para el revestimiento de un depósito de agua potable, su composición era de copolímero de isobutileno y aproximadamente 2% de isopreno.

En 1943, se comenzó a producir industrialmente el polietileno (PE). Su uso original fue principalmente en la industria del embalaje y modelado. Fue hasta los 60's, en Alemania, que el polietileno se desarrolló para el uso de geomembranas, expandiéndose a Europa, Africa, Australia y Norte América.

Por otra parte, desde 1950, el PVC fue utilizado en forma exitosa a gran escala en aplicaciones de depósitos, de agua potable y riego; aunque se desarrolló en 1939.

Ocupa el segundo lugar en importancia de usos, después del polietileno. Mientras en Europa se empleaban geomembranas de polietileno, en Estados Unidos se utilizaba el PVC para revestimiento de canales; su uso se expandió a Canadá, Hawaii, Rusia, Taiwan y Europa.

Existen estudios efectuados al PVC por la agencia del Gobierno de Estados Unidos, los cuales incluían un estudio realizado al revestimiento de canales instalados en el año 1968, y demuestran que la retención de las propiedades físicas va más allá de los requerimientos exigidos por la *National Sanitation Foundation* (NSF).

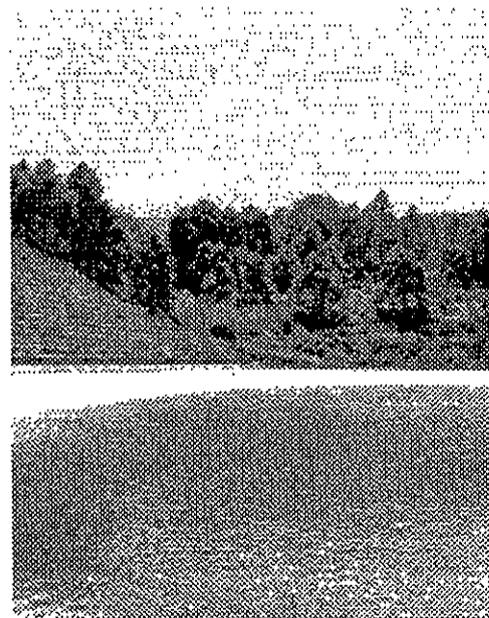


Figura 4.1 Embalse de la Florida (Icod de los Vinos) impermeabilizado con policloruro de vinilo plastificado sin refuerzo.

Desde 1957, *Reef Industries* ha fabricado laminados plásticos reforzados de gran resistencia, los cuales han sido utilizados para proteger casi todo lo que pueda ser susceptible a daño por los efectos del clima y la corrosión. Usos como cubiertas para el almacenamiento y transporte de equipos y maquinaria, la prevención de deslaves de compuestos solubles en suelos contaminados, cubiertas para campos deportivos, protección de silos y productos agrícolas, barreras contra la humedad y el vapor, cubiertas para el concreto mientras se cura, cubiertas para invernaderos, son únicamente el comienzo del tremendo potencial en las aplicaciones de recubrimiento. También se han usado en aplicaciones de contención para recubrimientos de estanques, cortinas para polvo, emisiones y membranas para control de los olores, y bolsas de alto rendimiento entre otras.

A finales de los 60's se aplicaron en Norte América geomembranas de polietileno clorosulfonado (CSPE) para embalses y revestimiento de rellenos, y tiempo después llegaron a Europa. A mediados de la década de los 70's, en México estaban disponibles placas y rollos asfálticos (ASF), membranas de isobutileno, isopreno o hule butilo (IIR), de poliolefina elastizada (ELPO) y película de polietileno (PE).

En 1974, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) investigó la posibilidad de producir un material plástico a partir de residuos de la destilación del petróleo (asfaltos) y polietileno (PE), para elaborar tubería y membranas de impermeabilización. Se produjeron aproximadamente 20 ton de la resina denominada asfaleno y se contrató la maquila para tubería y membrana. Esta geomembrana fue procesada en hojas de 0.25 a 0.30 mm (10 a 12 mils) de espesor, se aplicó en techos de unidades habitacionales de interés social y en la estación del Metro Chapultepec. Además, se utilizó para proteger tubería de acero de 0.91 m contra corrosión de la planta de tratamiento de aguas residuales en Texcoco, pegado a las conducciones por medio de adhesivo asfáltico y ha permanecido en contacto con los suelos salino-sódicos de esa región desde 1981. Aunque se realizó una campaña publicitaria, no existió una oferta adecuada del producto, ya que cuando se trató de adquirir para impermeabilizar tanques de tratamiento, no fue posible obtenerlo, pues sólo se procesó una pequeña cantidad como prueba.

Debido al escaso conocimiento sobre estos productos, a la dificultad para unir en forma satisfactoria al polietileno y a algunos fracasos, no se utilizaron membranas de polímeros durante varios años. Con el desarrollo de métodos de diseño racionales, la oferta de una amplia gama de geosintéticos y mejoras en los métodos de unión, el uso de geomembranas de cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE), y polietileno clorosulfonado (CSPE) se ha incrementado, también se inició el uso de geomembranas de bentonita (GCL o *geomembrane clay liner*). Aunque existen geomembranas de otros polímeros, se desconoce su utilización a escala nacional, tal es el caso de productos de polietileno clorado o clorinado (CPE), de monómero dieno-propileno-etileno (EPDM) y de otros de reciente aparición como el polipropileno (PP) y las aleaciones.

Por otro lado, en Chile, los sistemas de impermeabilización a partir de geomembranas han sido extensamente utilizados en la minería, tanto metálica (cobre y oro) como no metálica (sales, yodo) durante casi 20 años.

Numerosos proyectos mineros han operado pilas de lixiviación con este tipo de soluciones debido a la escasez local de arcillas. También sus piscinas de procesos han incorporado estos materiales por consideraciones en el factor costo-eficiencia.

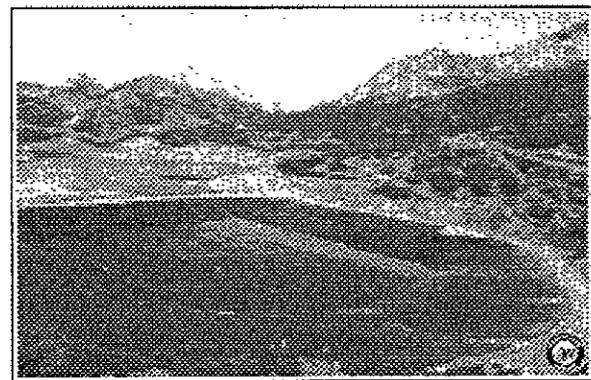


Figura 4.2 Revestimiento de polipropileno, Mina Barril Mercur (1996)

En los últimos años, consideraciones ambientales se han sumado a éstas en proyectos de tipo sanitario y ya se han comenzado a incorporar y especificar geomembranas y geosintéticos complementarios.

Ahora bien, el uso de la geomembrana se ha relacionado generalmente con el uso del agua, lo cual es justificable pues el agua a veces contiene plomo, plastificantes solubles o algún otro material que afecta la salud humana. En plantas depuradoras de aguas residuales municipales se utilizan HDPE, CSPE grado industrial, EPDM y PVC.

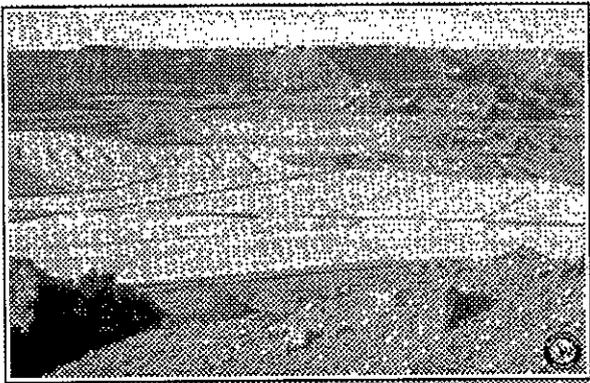


Figura 4.3 Revestimiento de 181 hectáreas de PVC para Morton Salt Company, Moab, UT (1971)

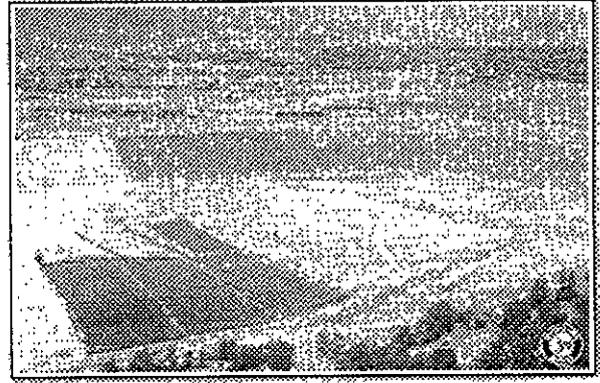


Figura 4.4 Embalse para desechos de uranio revestido con hypalon, 57 hectáreas, para Cotter Corporation (1978)

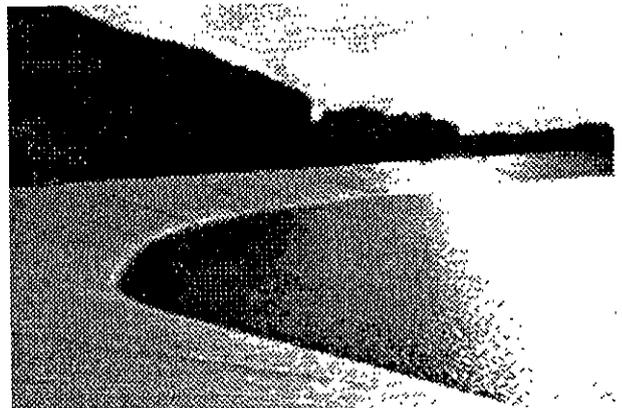
Para contener líquidos industriales es común el HDPE por su gran resistencia a derivados del petróleo, ácidos y bases, aunque debido a la gran variedad de líquidos que maneja la industria, se aplican también otros polímeros. Otras aplicaciones se dan en el manejo de desechos peligrosos, desperdicios industriales y municipales, minería, instalaciones recreativas, conducción de agua, presas de tierra y barreras impermeables de fluidos (vapor, lixiviados, etcétera.).

Actualmente, las geomembranas son fabricadas y distribuidas en todo el mundo, facilitando la adquisición de productos de diversos materiales y gracias a la técnica moderna, el uso de éstas se ha incrementado por su economía y rapidez en la ejecución de la obra.

Según Jagielski (1989), el consumo de geomembranas por tipo de polímero se distribuye de la siguiente manera: 41% para el polietileno, 33% para el cloruro de polivinilo plastificado, 17% para el polietileno clorado y el polietileno clorosulfonado y el restante 9% para hule butilo, EPDM, neopreno, entre otros.

Cabe señalar, que casi todas las geomembranas caen dentro del grupo de materiales termoplásticos. Estos son materiales que por definición son suaves y flexibles cuando se calientan, así mismo se unen fácilmente por calor, extrusión o procesos químicos, sin que existan cambios substanciales en las propiedades inherentes. Cuando enfrían, recuperan sus propiedades originales.

Figura 4.5 Embalse de la Laguna de Barlovento, en la Isla de La Palma; impermeabilizado con PVC/P-hs (PVC plastificado con inserción de tejidos de hilos sintéticos) en los taludes y PVC/P-h (PVC plastificado homogéneo) en el fondo.



4.1.1 Organismos Normativos

Inicialmente la NSF (*National Sanitation Foundation*) dictó algunos estándares para geomembranas, al parecer, actualmente ya no son válidos. Las normas de geomembranas aceptadas para su uso provienen de organismos como la Agencia de Protección Ambiental (EPA del inglés, *Environmental Protection Agency*) de los Estados Unidos y por supuesto de la ASTM, entre otras. En 1985, la Comisión Especial D 35 de la ASTM comenzó a considerar en sus pruebas a las geomembranas.

En 1996, el *PVC Geomembrane Institute* (PGI) se comprometió a reescribir, actualizar y reemplazar los estándares de las formas de trabajo con geomembranas existentes, sus socios unieron esfuerzos y crearon un documento sobre Control de Calidad en la Construcción, presentando a su vez los nuevos estándares para geomembranas de PVC, la PGI-1197. A continuación, se nombran algunos organismos que han generado estándares para geomembranas:

ISO	Organización Internacional de Estándares
ASTM	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
DIN	Comité Alemán de Estándares
UNE	Normatividad española
PGI	Instituto de Geomembranas de PVC

Cabe mencionar, que muchos estándares se han adoptado de otras pruebas y algunos otros están en diferentes estados de avance. Adicionalmente, existen muchos estándares que fueron adoptados en los plásticos, hules, materiales de recubrimiento y otros, por la ASTM y la NSF.

Como comentario, México también ha iniciado estudios a diferentes materiales poliméricos; se sabe que por la aridez del territorio nacional, se requiere en muchos casos revestir los canales para riego y, para determinar la conveniencia de utilizar nuevos materiales, la Comisión Nacional del Agua (CNA) a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), realizó recientemente un estudio sobre el uso de geomembranas expuestas al ambiente para obras hidráulicas.

4.2 Fabricación

La fabricación de geomembranas comienza con la producción de la materia prima, que incluyen la resina polimérica, varios aditivos, antioxidantes, plastificantes, rellenos, negro de carbón y lubricantes (como proceso de ayuda).

Véase la tabla 4.1, que proporciona las proporciones de diferentes materiales usados para la elaboración comercial de geosintéticos.

Existen tres métodos diferenciados para la elaboración de la lámina-geomembrana y se conocen en el mercado como: (Véase figura 4.4).

- Extrusión (Tipo lámina soplada y cubierta plana)
- Calandrado (aplicación de calor y presión por medio de rodillos)
- Impregnación o aspersion



Figura 4.6 Fase de la fabricación

Tabla 4.1 Polímeros geosintéticos comunes y sus fórmulas aproximadas (%)

Tipo de polímero	Resina	Relleno	Negro de carbón o pigmento	Aditivos	Plastificantes
Polietileno	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Polipropileno	96	0	2-3	1-2	0
Policloruro de vinilo (sin plastificar)	80	10	5-10	2-3	0
Policloruro de vinilo (plastificado)	35	25	5-10	2-3	30-35
Poliéster	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Nylon	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Poliestireno	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Polietileno clorosulfonado	45	20-25	20-25	5-7	0

El proceso de extrusión es aquel mediante el cual el material termoplástico es forzado a fluir continuamente en estado fundido a través de una hilera o boquilla, mediante la aplicación de calor y presión. A su salida el material ya conformado es recogido por un sistema de arrastre, mientras se enfría y alcanza la consistencia necesaria.

Existen dos tipos de extrusión para geomembranas, el de lámina soplada y el de calandrado, en los cuales se produce una tensión sobre el material a la salida, en cambio en la extrusión simple, el material se deja caer sobre un rodillo caliente de gran diámetro, con una longitud de hasta 14 m sin someterle a tensión.

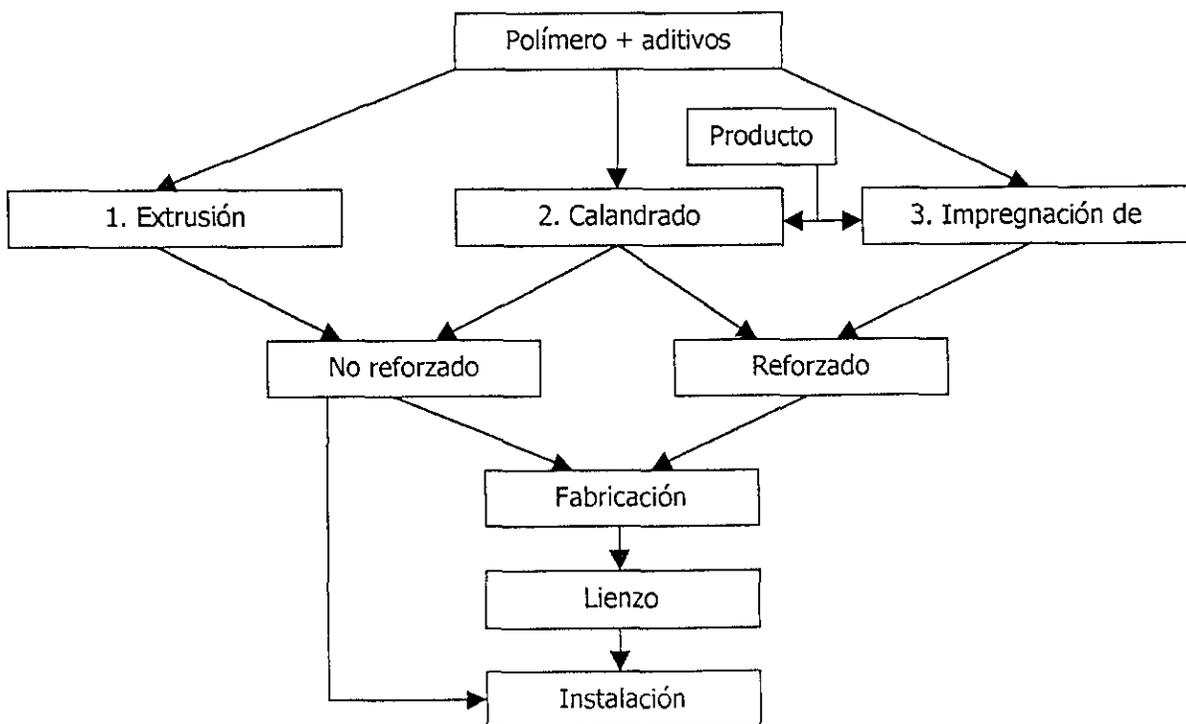


Figura 4.7 Métodos de fabricación utilizados para la elaboración de geomembranas, según Haxo.

Tabla 4.2 Principales diferencias entre los diferentes procesos de extrusión

Propiedades	Lámina soplada	Calandrado	Extrusión simple
Boquilla	Circular	Plana	Plana
Anchos máximos	7 m	9 m	12 m
Espesor	Ajuste malo (+10%)	Ajuste mejor (+5%)	Ajuste malo (+10%)
Acabado	Más irregular	Más regular	Intermedio
Propiedades químicas	Las mismas		
Propiedades físicas	Función del espesor	+10% en el sentido longitudinal	Isótropo

Las geomembranas terminadas pueden tener diferentes estructuras y texturas, estas últimas mediante coextrusión, impresión o laminación. Para evitar los orificios debidos a defectos de fabricación, las membranas más gruesas se obtienen frecuentemente superponiendo varias hojas y se refuerzan intercalando entre ellas una o dos telas de refuerzo, existen geomembranas reforzadas de este tipo hasta con 5 capas. Este refuerzo aumenta la resistencia a la tensión de la membrana y facilita su manejo y los empalmes, tanto en la fábrica como en el campo.

Sin embargo, las razones más importantes para reforzar una geomembrana son las siguientes:

- Estabilidad contra el punzonamiento
- Estabilidad contra el encogimiento
- Mayor resistencia al desgarre



Figura 4.8 Refuerzos

Las telas de refuerzo (algunos le llaman *scrim*) que tienen más aceptación son a base de algodón, yute, poliéster, vidrio y nylon. Aunque el nylon tiene algunos inconvenientes, sigue siendo el material más aceptado para telas de refuerzo de membranas. Su principal atractivo está en su fácil disponibilidad y en su resistencia a soluciones acuosas y organismos del suelo. Como desventaja debe mencionarse su baja resistencia a soluciones ácidas y a la luz solar y su falta de adherencia a cualquiera de los polímeros. La rapidez de deterioro del nylon a la luz solar depende del peso de la tela, del espesor de la capa de cobertura y de su color. Las fibras de poliéster presentan una buena resistencia a los ácidos y a la luz solar, se han convertido en competidoras del nylon; sin embargo, tampoco tienen propiedades adhesivas hacia los materiales que constituyen las membranas. Los espesores más usuales varían entre 0.50 mm a 100 mm, aunque para aplicaciones donde no se exponen a esfuerzos de importancia, se llegan a utilizar de 0.5 mm.

Cabe señalar, que todas las geomembranas de polietileno (HDPE, VLDPE, etcétera) son fabricadas por el método de extrusión. De acuerdo con Giroud y Frobel (1983), corresponden adecuadamente al término de geomembrana, los materiales fabricados con polímeros o asfaltos, reforzados o no con textiles, elaborados en planta o en el sitio, cuya principal característica es su muy baja permeabilidad, del orden de 1×10^{-12} a 1×10^{-16} cm/s.

En la actualidad se producen geomembranas de tres materiales básicos: asfalto, polímeros y arcilla. Los asfaltos se obtienen de depósitos naturales o como subproducto de la destilación del petróleo; las geomembranas asfálticas, además del material del cual toman su nombre, tienen rellenos de polvo o granos minerales en una proporción media de 35%, lo que reduce el costo del producto y aumenta la rigidez. Para reforzar internamente y estabilizar la masa se agregan fibras de vidrio o de asbesto.

También se les incorporan elastómeros entre 5 y 15%, para mejorar su resistencia al ambiente y su comportamiento mecánico.

Las geomembranas de polímeros se elaboran con una base de resina plástica, a la que se le agrega óxidos, rellenos minerales o polímeros naturales entre 0 y 20% a las de tipo termoplástico y, de 10 a 40% en las de tipo elastómero o hules.

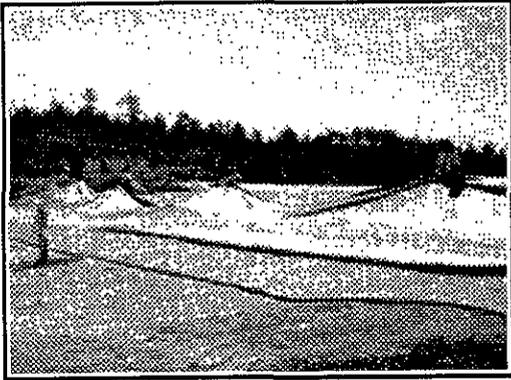


Figura 4.9 Geomembrana de PVC de 40 mils en un relleno en Victoria, B.C.

Además, se añaden plastificantes para impartirles flexibilidad y facilitar su fabricación, en proporción de 0 a 2% en las de elastómeros y hasta 55% en las de PVC; y con el fin de evitar la degradación del polímero por los rayos ultravioleta, se agregan pigmentos como el negro de humo a razón de 1 a 2% en los polímeros termoplásticos y de 10 a 45% en los elastoméricos. También se usan estabilizadores y antioxidantes para resistir el ataque de ozono.

Cada vez que mejora una cierta propiedad alguna otra se perjudica, regla que se aplica tanto a plásticos como elastómeros.

Debido a que los revestimientos con asfaltos y polímeros se degradan cuando se exponen a las inclemencias del medio ambiente, es recomendable cubrirlos con suelos, concreto u otro material; sin embargo, la cubierta representa un costo similar al del revestimiento.

4.3 Clasificación de las geomembranas

Se retoma la definición de geomembrana dada por la ASTM, como estructura planar polimérica (sintética o natural), esencialmente impermeable, manufacturado en forma de lienzo, usado en contacto con suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre.

La clasificación de las geomembranas se realiza por su forma de fabricación y la presencia o ausencia de refuerzo interno, según lo indican Giroud y Frobel (1983). Así se distinguen:

- Geomembranas elaboradas en el lugar sin refuerzo, que se hacen al aplicar por aspersion de asfalto o polímeros (como poliuretano) en estado líquido directamente sobre suelos y concretos
- Geomembranas elaboradas en el sitio con refuerzo, se aplica por aspersion el producto impermeabilizante sobre un geotextil
- Geomembranas elaboradas en planta sin refuerzo, fabricadas por medio de extrusion o calandrado (laminacion aplicando presion y calor con rodillos) o por aspersion sobre una hoja de soporte
- Geomembranas elaboradas en planta con refuerzo, producidas por aspersion del polímero sobre un geotextil o por calandrado con éste. En general, están formadas por varias capas; las exteriores constituidas por el polímero y las de en medio donde se localiza el refuerzo

Cuando las geomembranas son reforzadas con un geotextil, éste les permite proporcionar estabilidad al material impermeable durante su fabricación, impartir estabilidad dimensional contra contracción o medio físico como la temperatura, incrementar su resistencia mecánica y aumentar el módulo de rigidez.

Otra clasificación de geomembranas surge de acuerdo al tipo de polímeros que se utilizan para producirlas:

- Termoplásticos:
 - Cloruro de polivinilo (PVC)***
 - Cloruro de polivinilo resistente al petróleo (PVC-OR)
 - Cloruro de polivinilo Nitrilo termoplástico (TN-PVC)
 - Aleación interpolímero etileno (EIA)
 - Aleación interpolímero etileno reforzado (EIA-R)**

- Termoplásticos cristalinos:
 - Poliétileno de baja densidad (LDPE)
 - Poliétileno de baja densidad lineal (LLDPE)**
 - Poliétileno de muy baja densidad (VLDPE)***
 - Poliétileno de alta densidad (HDPE)***
 - Aleación de polietileno de alta densidad (HDPE-A)
 - Polipropileno (PP)*
 - Polioléfina elastizada

- Elastómeros termoplásticos:
 - Poliétileno clorado o clorinado (CPE)
 - Poliétileno clorado o clorinado reforzado (CPE-R)**
 - Aleación de polietileno clorado o clorinado(CPE-A)
 - Poliétileno clorosulfonado o hypalon (CSPE)
 - Poliétileno clorosulfonado reforzado o hypalon reforzado (CSPE-R)***
 - Monómero dieno propileno etileno termoplástico (T-EPDM)

- Elastómeros:
 - Hule isobutileno isopreno o hule butilo (IIR)
 - Monómero dieno propileno etileno (EPDM)
 - Policloropreno o neopreno (CR)
 - Hule epiclorohidrino (CO)

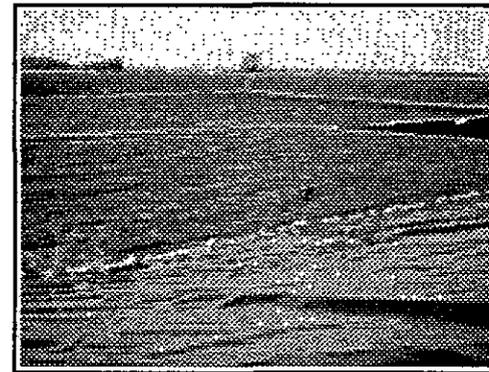


Figura 4.10 Geomembrana de HDPE de 80 mils, cubrió 40,000 m² de un embalse en Redwater, Alberta.

Nota:	***	Mayormente utilizadas
	**	Menos utilizadas
	*	Relativamente nueva

Las especificaciones de la EPA de los Estados Unidos, obligan el empleo de materiales seguros y de muy baja permeabilidad en el control de líquidos y residuos sólidos peligrosos, por lo que la información sobre estos geosintéticos es evaluada y difundida en forma periódica por esta institución. Véase la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Propiedades de los materiales utilizados para geomembranas

Propiedad	LDPE	HDPE	PVC	CPE	PP	Nylon	IIR	Hule natural	CSPE	EPDM
Densidad	0.92 a 0.94	0.94 a 0.96	1.24 a 1.30	1.35 a 1.39	0.90 a 0.91	1.08 a 1.40	0.92 a 1.25	0.91 a 1.25	1.4 a 1.5	1.15 a 1.21
Resistencia a tensión (kg/cm ²)	91 a 176	169 a 337	176 a 246	127 mínimo	281 a 2250	630 a 775	70 a 281	70 a 245	70 a 141	91 a 105
Deformación a la falla o elongación (%)	200 a 800	10 a 650	250 a 350	375 a 575	40 a 400	250 a 550	300 mínimo		300 a 500	300 mínimo
Dureza Shore "A"	n.d.	n.d.	65 a 75	65 a 75			45 a 80	20 a 100	55 a 95	50 a 70
Temperatura de operación (°C)	-57 a 82	-57 a 116	-51 a 93	-40 a 93	-51 a 104	-50 a 170	-46 a 163	-55 a 120	-43 a 93	-59 a 149
Temperatura de operación (°F)	-70 a 180	-70 a 240	-60 a 200	-40 a 200	-60 a 220	-60 a 380	-50 a 325	-70 a 250	-45 a 250	
Resistencia a ácidos	P a B	B	B a E	B a E	B a E	P	B		B	B a E
Resistencia a bases	B a E	B a E	B a E	B a E	B a E	E	B		B a E	B a E
Resistencia a solventes oxigenados	P a B	P a B	B	P	P		B a E		B	B a E
Resistencia a solventes aromáticos y halogenados	R a B	R a B	B	P	B	B	P	P	R	P
Resistencia a solventes alifáticos (petróleo)	R a B	R a B	B	B	B	E	P	P	B	P
Permeabilidad al vapor de agua (10 ⁻¹⁴ m/s)	4.3 a 19.9	2.6 a 3.1	4.3 a 25.6	0.06 a 0.07	0.36 a 1.42		0.21		2.8	2.8
Permeabilidad al vapor de agua (por mils)	3 a 14	1.8 a 2.2	3 a 18	0.04 a 0.048	0.25 a 1	0.09 a 1.0	0.15		2.0	
Resistencia al intemperismo	P (s/p)	P (s/p)	P a R	E	P (s/p)	R	B	R	E	E
Tiempo de agrietamiento (hr)	900	300	no ocurre a 2500	sin efecto a 4000	100		sin efecto más de 2500		sin efecto más de 1000	sin efecto más de 1000
Tiempo de desintegración (hr)	sin efecto a 2500	600	300	sin efecto a 4000	600		sin efecto más de 2500		sin efecto más de 1000	sin efecto más de 1000
Tiempo de decoloración (hr)	300	300	100	sin efecto a 4000	900		sin efecto más de 2500		sin efecto más de 1000	sin efecto más de 1000
Esperanza de vida (años)							>20		>20	15 a 20
Instalación a la intemperie	no	no	no	si	no		si		si	si

P=pobre, R=regular, B=buena, E=excelente, s/p=sin protección contra intemperismo, n.d.=no disponible (pruebas ASTM)

4.3.1 Principales tipos de geomembranas

Cloruro de polivinilo (PVC)

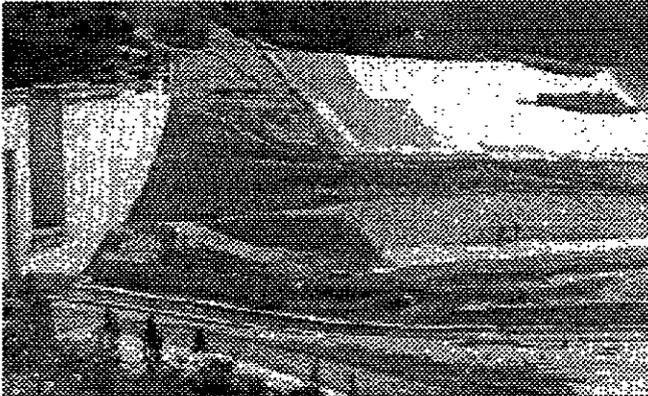


Figura 4.11 Presa Castreccioni con geomembrana de PVC en Italia

El PVC es un material excelente contra corrosión, posee gran flexibilidad, excelente resistencia a la abrasión y buena resistencia general y a un gran número de soluciones químicas comunes. No lo afecta el ozono, contrariamente al hule. Las membranas de PVC se fabrican en espesores de 10 a 200 mils (1 mil = 0.001 in = 0.025 mm) en lienzos sencillos. Las juntas son fáciles de ejecutar. Las membranas de PVC tienden a rigidizarse con el tiempo, debido principalmente a que van perdiendo el plastificante, ya sea por extracción de agua, por volatilización térmica o ambos.

Estos cambios van acompañados de un aumento en la resistencia a la tensión y en la dureza, por lo que se vuelven más frágiles. Esto significa que el PVC presenta un comportamiento muy desfavorable ante el envejecimiento y por ello, no se debe usar directamente expuesto a la atmósfera, salvo en instalaciones temporales (menos de 2 años). Generalmente es necesario proteger a las geomembranas de PVC con un relleno de 10 a 15 cm de espesor mínimo. El PVC si se cubre adecuadamente con una capa de tierra, trabaja satisfactoriamente. La vida depende de la temperatura a la que se encuentre expuesta.

Polietileno (PE)

El polietileno no necesita plastificante, de hecho, no se puede plastificar para formar un material blando y flexible. El polietileno tiene una característica única de rigidez que, dentro de márgenes estrechos, no se puede modificar. A medida que la película de PE aumenta su espesor, se hace más rígida a tal punto que una película de 8 mils es casi el límite práctico de su utilización como revestimiento. Los espesores de fabricación pueden alcanzar hasta 200 mils (5 mm).

El material es resistente a casi todo. De hecho, es tan resistente que los adhesivos líquidos no surten efecto en él. Sin embargo, tiene baja resistencia a los hidrocarburos y aceites. El punto de fusión del PE tiene un intervalo reducido de variación, por lo que la unión con calor de películas de PE es un proceso extremadamente difícil de controlar y no son aplicables las técnicas de empalmado electrónico. Casi la única forma de poder unir este material es por medio de una cinta adhesiva o de algún material adherible extruido, pero aún así la junta no se puede considerar permanente.

La película de PE tiene características muy pobres de envejecimiento a la intemperie (baja resistencia al ozono) y no se aconseja dejarla expuesta directamente a la atmósfera salvo en instalaciones temporales (menos de un año) a menos que se entierre, debido a la acción de los rayos solares que causan las roturas a su vez provocadas por la carga de trabajo y el encogimiento que sufre el material.

En México, se fabrica una membrana de bajo costo a base de polietileno y asfaltos especiales, este producto se ha comercializado principalmente para la impermeabilización de edificios, pero también se ha empleado para lagunas con poco éxito, debido sobre todo a la dificultad de realizar uniones confiables con este material y a las limitaciones propias de sus componentes.

Polietileno de alta densidad (HDPE)

Las geomembranas de HDPE son geomembranas cuya densidad es mayor a 0.94 g/cm^3 . Su principal uso es la impermeabilización y almacenamiento de líquidos y sólidos.

Esta posee gran resistencia química y excelentes propiedades mecánicas, además contiene 2 - 3% de negro de humo lo que la hace resistente a la radiación ultravioleta.

Por más de 10 años se han utilizado geomembranas de HDPE en rellenos sanitarios de diversos países dando buenos resultados, funciona adecuadamente con los sistemas de unión convencionales, es económica, muestra adecuada expansión y contracción térmica ante variaciones severas de temperatura, es prácticamente impermeable al biogás y presenta alta resistencia a la degradación por los rayos ultravioleta.



Figura 4.12 Embalse San Isidro donde se empleó HDPE para su impermeabilización.

Los problemas observados de su uso, son la rigidez del material al usar espesores mayores a 1.5 mm (en algunos rellenos sanitarios y centros de confinamiento se recomiendan espesores no menores a 2 mm), por lo que se presentan dificultades al trabajar a bajas temperaturas, ocasionalmente falla por tensión y por variaciones en las cargas (fatiga).

Polietileno de baja densidad lineal LLDPE ó VFPE (*Very Flexible Polyethylene*)

Las geomembranas de LLDPE son fabricadas con resina de polietileno de mediana densidad (*Very Flexible Polyethylene* VFPE), lo cual hace que tengan mayor flexibilidad, mayor resistencia al punzonamiento y una gran capacidad de elongación.

Polietileno de muy baja densidad (VLDPE)

La geomembrana de VLDPE presenta una flexibilidad muy alta, con un compendio de propiedades adecuadas para gran número de aplicaciones, entre las que cabe destacar, la impermeabilización de túneles, sellado de vertederos, balsas de agua en terrenos conflictivos con riesgo de movimientos del soporte.

Polipropileno (PP)

Las geomembranas de polipropileno generalmente tienen alta resistencia mecánica, aún en temperaturas extremas; así mismo, resisten los aceites y grasas comunes en los rellenos sanitarios. Se pueden lograr buenas uniones y reparaciones utilizando sistemas de aire caliente. Las dificultades detectadas son el bajo coeficiente térmico (contracción-expansión) y dificultades con los sistemas de juntas o unión.

Además en el proceso de laminación del PP, debido a su menor grado de cristalinidad, es posible introducir refuerzo o mallas en su interior, con lo que se obtienen láminas con gran resistencia a la tensión con bajos espesores.

Polietileno clorado o clorinado (CPE)

El polietileno clorado resulta de la cloración de polietileno de alta densidad. Así, se obtiene un material análogo en su composición al PVC, pero con mejor resistencia a los agentes climáticos. El producto se presta también a todas las técnicas de unión comunes. Se fabrica en espesores de 1 a 90 mils. Además, se puede unir con geomembranas de PVC.

Hule butilo (IIR)

El hule butilo llamado también caucho estireno, tiene una vida útil expuesto al intemperie de al menos 15 años; si se considera su gran flexibilidad y resistencia que reduce al mínimo el peligro de roturas, y el gran ahorro que implica el no tener que enterrarlo, conlleva a que el butilo a pesar de su precio, que es más alto en relación a los plásticos, resulta ser a largo plazo el material comercial más económico para almacenar agua. Una ventaja adicional es la fácil localización y reparación de una eventual rotura, que en materiales enterrados es prácticamente imposible, además la membrana puede cambiarse de sitio a uno que resulte más conveniente. Se sabe que se utilizó un revestimiento de hule butilo en una de las mayores instalaciones realizadas en el mundo.

Hypalon o Polietileno clorosulfonado (CSPE)

El hypalon es una resina cuyas características de mezclado siguen patrones muy semejantes a las del PVC. Se produce al reaccionar el etileno con el cloro y el azufre dando lugar a un hule vulcanizable con algunas propiedades fuera de lo usual. Destacan en particular su alta resistencia al ozono y al punzonamiento, su flexibilidad, facilidad de instalación y su alta resistencia química (se han manejado garantías de 20 años en rellenos sanitarios). El material presenta fallas al exponerlo largos períodos a algunas sustancias derivadas del petróleo.



Figura 4.13 Habilitado de una geomembrana

Las membranas de hypalon se prestan a una gran variedad de técnicas de fabricación y pueden unirse por varios métodos como el dieléctrico, el térmico, unión con solventes. Los sistemas adhesivos para la unión entre lienzos inducen la falla de la capa o el paulatino desprendimiento de las partes que están en contacto. Se recomienda utilizar sistemas de enlaces químicos con sustancias totalmente compatibles. Se fabrican en espesores de 30 y 45 mils.

Neopreno o policloropreno

El neopreno es el producto de la polimerización controlada del cloropreno. Este monómero está muy relacionado con el isopreno, que es bloque de la fabricación del hule natural. Su costo es alto, pero presenta una buena resistencia a los hidrocarburos, ácidos y otros productos químicos. Se fabrica en espesores de 20 a 45 mils.

Polioléfin elastizado (3110 o MX 2000)

Este producto, que ha sido comercializado en México con el nombre "MX 2000", presenta la ventaja de que las uniones se pueden hacer térmicamente con una herramienta portátil. Es más económico que el hypalon, pero se vende sin garantía a pesar de su buena resistencia a la luz solar. Su espesor es de 20 mils.

Alación de etileno interpolimerizado (EIA)

La más importante ventaja de este material es su alta resistencia química y mecánica sin pérdida de flexibilidad, se manejan 10 años de garantía. Se recomienda utilizar uniones mediante fusión. La principal desventaja es la dificultad de reparación, después de haber tenido contacto con sustancias químicas agresivas.

Geomembranas de bentonita (GLC *geomembrane clay liner*)

Este tipo de geomembrana es considerada como un sistema impermeable híbrido o geocompuesto para impermeabilización. Son de reciente desarrollo y se elaboran mediante el procedimiento textil de entrelazado mecánico (o punzonamiento con agujas), se producen láminas flexibles de bentonita sódica encapsulada por ambas caras con geotextiles, formando una barrera de unos pocos milímetros de espesor y baja permeabilidad.

Para mantener la arcilla en posición durante su manejo e instalación, se utilizan adhesivos químicos, costuras a través del producto o se realiza un punzonado de éste para entrelazar las fibras de las dos caras.

El propósito es obtener una membrana impermeable prefabricada que combine las bondades de la bentonita, con la facilidad de instalación de la presentación laminada, que muestra muchas ventajas con respecto a la aplicación de bentonita a granel.

Las GLC se fabrican en anchos de 13 a 17 ft (4.0 a 5.2 m) y longitudes de 100 a 200 ft (30 a 61 m). Una vez fabricadas se enrollan y se cubren con un plástico para evitar humedad (hidratación) adicional durante el almacenamiento, transportación y ubicación previa en obra antes de la colocación final.

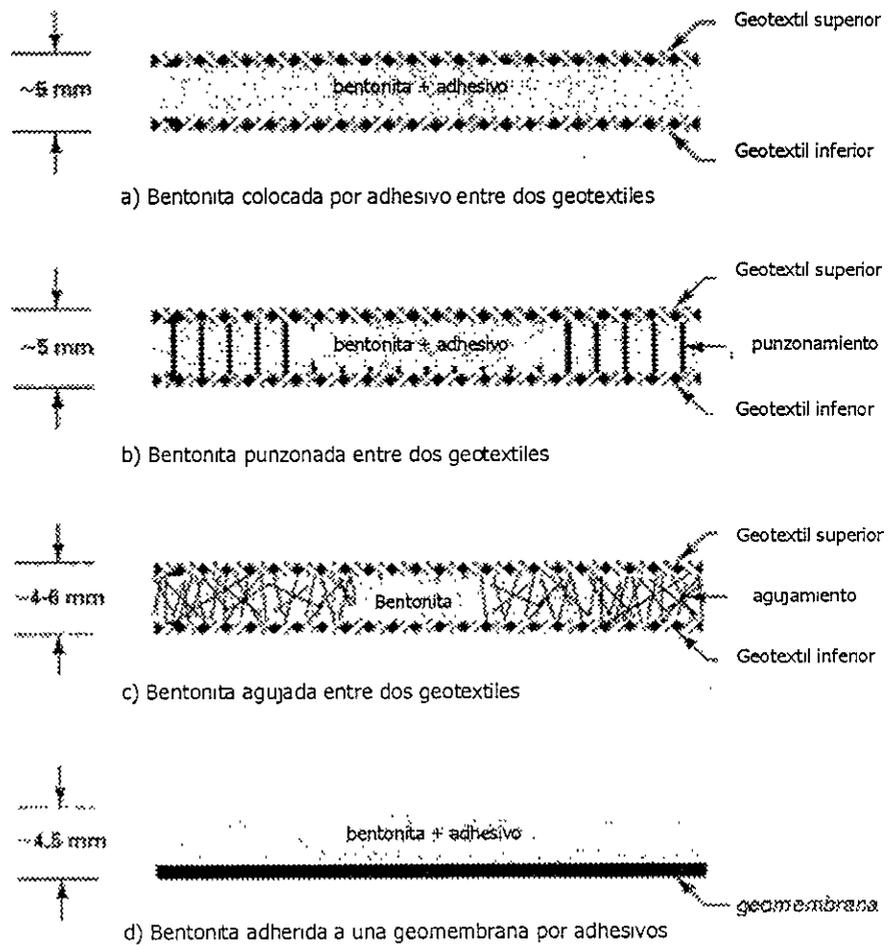


Figura 4.14 Geocompuestos de bentonita (GLC)

En primer lugar, el control del espesor es una ventaja evidente, donde las propiedades de separación de los geotextiles se aprovechan por completo; en segundo lugar, por efecto de la penetración de las fibras del geotextil en la bentonita granular contenida, al aplicarse el punzonamiento, existe mayor entrelazamiento entre el par fibra-arcilla, produciendo un comportamiento casi monolítico de la lámina; los enlaces entre lienzos presentan una relativa dificultad, ya que no existen desplazamientos mayores al 7%.

La utilización de este tipo de geocompuestos es principalmente en obras de impermeabilización de estructuras que contienen agua o fluidos contaminantes. Frecuentemente en obras de protección ambiental como los rellenos de residuos peligrosos, se utiliza este tipo de geocompuesto GLC en lugar de capas de arcilla compactada, según lo especifica la EPA. Cuando los contenidos de humedad son menores al 75%, existen problemas por la remoción de los minerales (se incrementa la conductividad hidráulica hasta 1×10^{-5} cm/s). Por lo anterior, se recomienda saturar el material y colocarlo en conjunto con otra barrera impermeable.

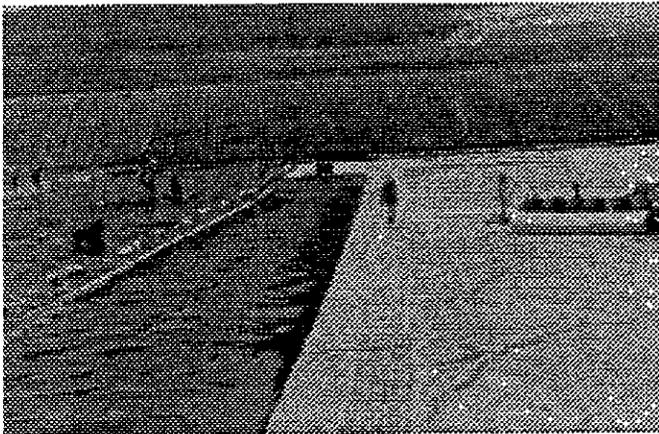


Figura 4.15 Geomembrana colocada sobre un geocompuesto de bentonita

El uso más amplio, eficiente y seguro de este tipo de geomembrana, se ha dado en los sistemas de cubierta donde sólo entra en contacto con el agua, funcionando adecuadamente aún después de las fases de secado, ya que se recupera rápidamente de los agrietamientos al entrar nuevamente en contacto con la humedad. Al interactuar con el geotextil se adapta a los asentamientos diferenciales. Las ventajas de este tipo de geomembrana son la seguridad y facilidad de instalación, la continuidad entre rollos que se logra mediante simples traslapes, los cuales al hidratarse expandirse la bentonita, sellan por sí solos.

Lo anterior se compara como ventaja con respecto al uso de geomembranas que requieren de programas de aseguramiento de la calidad muy intensos para verificar el correcto sellado de las uniones entre rollos y lienzos del material. Adicionalmente la GLC es autosellante, pues en caso de perforarse, la bentonita se expande restaurando la continuidad. Para el caso de contención de productos químicos diferentes al agua, debe verificarse la compatibilidad química de estos materiales.

Cabe señalar, que las GLC han encontrado aplicaciones únicas por sus características como:

- Debajo de una geomembrana en el revestimiento primario de un relleno.
- Debajo de una geomembrana en el revestimiento secundario de un relleno.
- Debajo de una geomembrana en la cubierta de un relleno.
- Encima de geomembranas como protección contra pinchazos provocados por grava gruesa.
- Como porción de un revestimiento de arcilla compactado en recubrimientos compuestos primarios
- Como porción de un revestimiento de arcilla compactado en recubrimientos compuestos secundarios.
- Como revestimiento secundario de tanques de almacenamiento subterráneos.
- Como revestimiento único para superficies de embalses y simple para canales.
- Debajo de una geomembrana como recubrimiento superficial compuesto de embalses.
- Debajo de una geomembrana como revestimiento compuesto para el control de lixiviados.

El uso de GLC se ha movido de la concepción a la aplicación quizá más rápido que cualquier otro producto geosintético. Se estima que aproximadamente 7 millones de yd^2 (63 millones de ft^2) fueron instalados en 1992. Dentro de este total, las aplicaciones estimadas se consideran como sigue:

Revestimiento de rellenos (usualmente debajo de una geomembrana)	50% ó 32 millones ft^2
Cubiertas de rellenos (usualmente debajo de una geomembrana)	35% ó 22 millones ft^2
Revestimientos secundarios para tanques de almacenamiento subterráneos	10% ó 6 millones ft^2
Otros	5% ó 3 millones ft^2

4.3.2 Otros tipos de geomembranas

Geomembrana lisa: Esta geomembrana es el estándar para los revestimientos industriales.

Geomembrana con textura: Posee una (o ambas) superficie(s) o cara(s) rugosa(s), con lo cual se aumenta el coeficiente de fricción entre la geomembrana y el material depositado y/o de la base.

Geomembrana blanca: Es una geomembrana fabricada con una capa coextruida de color blanco. La superficie blanca refleja la luz solar con lo cual se logra una reducción de las dilataciones y/o contracciones térmicas y una mayor facilidad para la inspección visual después de instalada o durante la instalación. Mantiene su resistencia a la radiación ultravioleta.

Geomembrana conductiva: Es una geomembrana con una finísima superficie de carbón electroconductora coextruida, que permite detectar orificios con el control de arco eléctrico. Utilizada en proyectos donde es imprescindible la comprobación de la integridad de la misma y la localización de perforaciones en el terreno.

Geomembrana retardante de fuego: Posee la cualidad de ser inhibidor del fuego. Este tipo de revestimiento es propio para ser utilizado en aplicaciones petroleras, petroquímicas, etc.

Geomembrana protectora para concreto: El *StudLiner* es una geomembrana de polietileno de alta densidad, especialmente diseñada para proteger la integridad estructural del concreto ante ataques químicos y/o daños mecánicos. Esta geomembrana tiene incorporados aproximadamente 1,180 estoperoles por metro cuadrado (1 cada 3 cm), los cuales se extruyen en la lámina durante el proceso pasando a ser parte integral de la geomembrana. La gran cantidad de estoperoles permite una excelente adherencia mecánica al concreto, se obtienen resistencias a la extracción del orden de 48 ton/m². Además, proveen de una distribución de tensiones óptima, minimizando las deformaciones lineales generadas por variaciones de temperatura.



Figura 4.16 *Studliner*

El *Polylock* es un perfil de HDPE, que sirve para anclar las geomembranas a las estructuras de concreto. Este perfil debe ser instalado durante el proceso de colocación del concreto. La geomembrana se suelda al *Polylock* transformándose en una unión estanca, evitando así las uniones mecánicas con el concreto en zonas en que se requiere sello hidráulico. Las dimensiones de este perfil son: 305 cm de largo, 15 cm de ancho y el anclaje de 2.5 cm de profundidad.

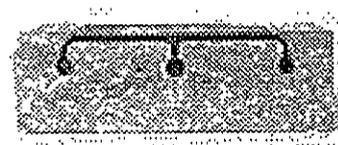


Figura 4.17 *Polylock*

4.4 Propiedades

Cada proyecto exige el cumplimiento de una serie de factores y combinación de propiedades propios del mismo, los cuales indican si debe o no emplearse una geomembrana y de qué tipo. Entre las propiedades involucradas están: el grado de impermeabilidad, compatibilidad química con el fluido o sólido a contener, temperatura de operación, exposición a la intemperie, etcétera.

Por otra parte, las propiedades mecánicas están sujetas al análisis de esfuerzos a que será sometida la geomembrana, causados entre otras cosas por el peso propio, el peso del relleno o material dispuesto sobre la geomembrana, el impacto con objetos (sobretudo durante la instalación), las perforaciones provocadas por objetos del suelo donde se coloca, asentamientos, presión de gases, etcétera.

4.4.1 Propiedades físicas

Espesor: La prueba empleada en geomembranas es la ASTM D 5199. Se realizan con un estricto control, utilizando un micrómetro y presión determinada de 20 kPa (2.9 lb/in²). Cuando se mide el espesor de una geomembrana suave, existe cierta ambigüedad en el procedimiento. Cuando las medidas se realizan en geomembranas reforzadas (de varias capas) o en geomembranas envejecidas que se han hinchado, se debe tener extremo cuidado, especialmente al preparar la probeta de prueba y al aplicar presión. Para geomembranas de polietileno con textura (HDPE y VLDPE), el espesor de la geomembrana base debe medirse al micrómetro junto con los suaves bordes de tiras que forman la textura hecha por impresión o laminación. Para las geomembranas de HDPE con textura a base de una película de material coextruido que sobresale de la membrana base, se realizan mediciones rigurosas con un micrómetro especial punto a punto. Para las de VLDPE con textura coextruida, la presión aplicada por el micrómetro puede dañar la película provocándole un pinchazo, se recomienda auxiliarse con una lupa microscópica para obtener una exactitud de 2 mils (0.05 mm). La mayoría de las geomembranas usadas en la actualidad son de 20 mils (0.50 mm) de espesor o mayores. Las regulaciones actuales para los revestimientos de rellenos de residuos peligrosos exigen 30 mils (0.75 mm) o más.

Densidad: La densidad o gravedad específica de una geomembrana depende del material base con el que se elaboran, aunque existe una diferencia, aún cuando se trate del mismo polímero. Por ejemplo, el polietileno se elabora en: muy baja densidad, baja densidad, baja densidad lineal, mediana densidad y alta densidad. El rango para todos los polímeros de geomembranas caen dentro de los límites 0.85 a 1.5 g/cm³. El método utilizado es el ASTM D 792. Un método más exacto, que incluso se puede utilizar para materiales con densidades menores a 1 es el ASTM D 1505, la exactitud que se logra si se tiene el adecuado cuidado está dentro de 0.002 g/cm³.

Índice de fusión o de fluidez (MI): El método MI es usualmente utilizado por los fabricantes de geomembranas para controlar la uniformidad del polímero. Relaciona la habilidad del polímero para fluir en estado fundido. Se emplea al principio y al final de la elaboración de la geomembrana. El método es el ASTM D 1238. Este proceso es muy importante en el control y aseguramiento de calidad de las resinas de polietileno y de las geomembranas.

Masa por unidad de área: Relaciona el peso de la geomembrana, es decir, su masa por unidad de área. El método empleado es el ASTM D 1910. Las unidades que se utilizan comúnmente son: oz/yd², g/m². El valor de conversión es 1 oz/yd² = 33.9 g/m².

Transmisión de vapor de agua (WVT): Sabiendo que ningún material es impermeable, el conocer la relativa impermeabilidad de las geomembranas resulta importante. El método podría adaptarse de la ingeniería geotécnica, usando agua como fluido, pero sería impráctico. En tal caso, los principios de la hidráulica requeridos serían tantos que seguramente habría filtraciones o muestras falladas. Otros problemas podrían darse al probar períodos muy largos, pues la evaporación sería un problema considerable. Mientras se desarrolla otro proceso, el vapor de agua es usado como fluido permeante. En la prueba ASTM E-96 de transmisión de vapor de agua, una muestra es sellada sobre una taza de aluminio, ya sea con agua o desecante dentro, manteniendo una diferencia relativamente controlada de humedad.

Con agua en la taza (es decir 100% de humedad relativa), y una muy baja humedad relativa afuera, se puede monitorear una pérdida de peso al dejar transcurrir tiempo. Con desecante en la taza (es decir 0% de humedad relativa), y una muy alta humedad relativa afuera, se puede observar con el tiempo un incremento de peso que puede monitorearse apropiadamente. El lapso de tiempo requerido varía, pero es usual de 3 a 30 días. Entonces, se puede calcular la transmisión de vapor de agua y la permeabilidad.

Tabla 4.4 Valores de transmisión de vapor de agua, según Haxo

Tipo de geomembrana	Espesor		WTV (g/m ² -dia)
	mil	mm	
PVC	11	0.28	4.4
	20	0.52	2.9
	30	0.76	1.8
CPE	21	0.53	0.64
	31	0.79	0.32
	38	0.97	0.56
CSPE	35	0.89	0.44
EPDM	20	0.51	0.27
	48	1.23	0.31
HDPE	31	0.80	0.017
	96	2.44	0.006

Transmisión de vapores de solventes (SVT): Cuando se utilicen otros líquidos diferentes al agua, el concepto de permeabilidad selectiva debe considerarse, ya que los valores de transmisión de vapor pueden ser muy diferentes que si se tratara de agua. Matrecom demostró que los solventes orgánicos están dentro de esta categoría.

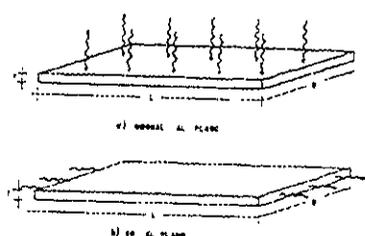
La prueba es paralela a la E-96 (WTV), excepto en que ahora el solvente de interés es colocado dentro de la taza. Obviamente, se deben seguir procedimientos cuidadosos y adecuados de laboratorio, principalmente si se usan solventes peligrosos o radioactivos. Esta prueba debe considerarse cuando la geomembrana se utilice para las siguientes aplicaciones:

- Contención de líquido químico conocido
- Contención de lixiviados en rellenos
- Contención de gas metano en cubierta para relleno

- Contención de vapor de hidrocarburos
- Contención de gas radón

Se puede obtener información adicional en las pruebas ASTM D 1434 sobre transmisión de gas y la D 814 de transmisión de vapor orgánico.

Filtración por conductibilidad hidráulica:



Como se ha dicho, todos los materiales tienen permeabilidad, algunos muy baja como los suelos finos compactados, los concretos, los asfaltos y los plásticos o polímeros.

En los geosintéticos continuos se distinguen dos tipos de flujo: el debido a la permeabilidad primaria del material en el sentido normal al plano y el que ocurre a través de discontinuidades (a través del plano del geosintético). En el flujo por permeabilidad, es determinante el espesor de la geomembrana T_g , el cual varía entre 0.5 y 3.0 mm cuando se usan polímeros, y entre 6.3 y 25.4 mm cuando se emplean asfaltos.

Figura 4.18 Flujo en geosintéticos

Para evaluar el caudal a través de la geomembrana se utilizan algunas relaciones entre su conductibilidad hidráulica o permeabilidad, caudal del fluido y espesor de la membrana. A continuación se indican estas relaciones, expuestas en la obra de Giroud de 1984.

Conductibilidad hidráulica o permeabilidad k: Se define como el volumen de fluido V que pasa por unidad de superficie de geomembrana A, con un gradiente unitario i, en una unidad de tiempo t.

$$k = V/(A i t) \quad , \text{ (m/s)}$$

Permisibilidad ψ : Se define como el volumen de fluido V que pasa por una unidad de superficie de geomembrana A, con una carga hidráulica unitaria h, en una unidad de tiempo t.

$$\psi = V/(A h t) \quad , \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Impedancia I: Tiempo t necesario para que una unidad de volumen de fluido V, pase por una unidad de superficie de geomembrana A, con una carga hidráulica unitaria h.

$$I = A t h / V \quad , \text{ (s)}$$

Permeancia ω : Se define como la masa del fluido M, que pasa por una unidad de superficie de geomembrana A, por cada unidad de presión p, en una unidad de tiempo t.

$$\omega = M / (A p t) \quad , \text{ (kg/(m}^2 \text{ Pa s))}$$

Tasa de transmisión de vapor de agua WVT: Se define como la masa de vapor de agua M, que pasa por una unidad de superficie de geomembrana A, en una unidad de tiempo t, bajo una presión p.

$$WVT = M/(A t) \quad , \text{ (kg/(m}^2 \text{ s))}$$

Las relaciones entre estos términos son:

$$k = \psi T_g$$

$$I = 1 / \psi$$

$$\omega = \psi / g$$

$$WTV = p \omega = p \psi / g$$

donde T_g = espesor de la geomembrana

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

p = presión de vapor en la prueba de transmisibilidad

En virtud de que el término conductibilidad hidráulica equivalente (k_g), obtenido en pruebas de transmisión de vapor de agua, es interpretado como el flujo del agua a través de los poros de la geomembrana y a que el mecanismo real de la migración del agua es diferente, debido a que k_g varía con el gradiente y con la carga hidráulica, se ha propuesto recientemente utilizar el concepto de coeficiente de migración en geomembranas, definido de acuerdo con Giroud y Bonaparte como sigue:

$$m_g = k_g \Delta h \quad \text{(m}^2\text{/s)}$$

y por lo tanto

$$q_g = Q_g/A = m_g / T_g \quad , \text{ (m/s)}$$

donde q_g = gasto unitario por unidad de superficie de geomembrana A debido a la permeabilidad
 Q_g = gasto total debido a la permeabilidad
 m_g = Coeficiente de migración de la geomembrana

Por lo anterior, para calcular el gasto por transmisibilidad hidráulica que pasa a través de una membrana, pueden emplearse las siguientes ecuaciones:

$$Q_g = K_g A i, \text{ (m}^3\text{/s) ó bien}$$

$$Q_g = m_g A / T_g, \text{ (m}^3\text{/s)}$$

que dependerá del tipo de prueba que se efectúe, utilizando la primera cuando se realicen ensayos en permeámetro y la segunda cuando se apliquen resultados de pruebas de transmisión de vapor de agua. Al respecto, cabe señalar que la tendencia es realizar pruebas del último tipo. De acuerdo con Giroud, la permeabilidad de las geomembranas disminuye con la presión y no es afectada de manera importante por la elongación.

4.4.2 Propiedades mecánicas

Comportamiento a la tensión: Existen varias pruebas de tensión realizadas sobre muestras de geomembranas, las cuales son muy pequeñas de tamaño y son usadas rutinariamente para el control de calidad y control de aseguramiento de la fabricación de las hojas. Los procedimientos generales de la prueba se describen en: ASTM D 638, D 882, D 751. Estas pruebas muestran que la geomembrana reforzada de CSPE-R soporta el mayor esfuerzo aplicado, pero falla abruptamente cuando el refuerzo se rompe. Sin embargo, la respuesta no desciende a cero porque la geomembrana cede en ambas caras del refuerzo intacto hasta que la falla última ocurre. Las geomembranas de VLDPE y PVC dan una respuesta suave, gradualmente incrementando el esfuerzo de tensión hasta la falla a 700% y 450% de deformación, respectivamente. La geomembrana de HDPE responde en forma característica mostrando un pronunciado beneficio, descendiendo levemente, entonces su deformación aumenta aproximadamente hasta 1000% llegando a la falla.

También se realizan pruebas de tensión de tira ancha, que cubren una situación más crítica no experimentada en campo, la contracción central. La prueba es la ASTM D 4885 usada también en geotextiles, con la diferencia de la velocidad de deformación para las geomembranas. El ancho habitual de la tira es de 8 in (200 mm) como en los geotextiles. La prueba D 4885 recomienda una velocidad de 1.0 mm/min (0.04 in/mm). Por tanto, para una geomembrana con 200% de deformación a la falla, la prueba requeriría de 3.3 horas para completarse.

Otro tipo de prueba, consiste en analizar la tensión provocada por deformación local de la base de la geomembrana, tal es el caso de una geomembrana empleada en un relleno, revistiendo residuos sólidos.

Comportamiento de las uniones (llamadas también costuras, soldaduras, juntas): El unir rollos o paneles de geomembranas genera siempre una junta, la cual puede ser más débil que la misma geomembrana. Esto es particularmente cierto si las juntas se realizan en campo, ya que las elaboradas de fábrica, observan un control de calidad más riguroso. Existen varias pruebas disponibles para determinar la resistencia de una junta de geomembrana, entre las típicas de resistencia al corte están: ASTM D 4437, D 3083, D 751; y las de resistencia al despegue o desprendimiento son ASTM D 4437 y D 413.

Resistencia al rasgado o desgarre: La medición de la resistencia al rasgado de geomembranas puede hacerse de varias maneras: ASTM D 2263, D 1004, D 751, D 1424, D 2261 y D 1938, todas cubren el concepto general. El primer método de prueba D 2263, también es llamado rasgado trapezoidal y se recomienda su uso. Una muestra de geomembrana en forma trapezoidal es sujeta a tensión hasta que comienza a desgarrarse por sí misma, la resistencia al rasgado es igual a la carga máxima. En geomembranas delgadas, no reforzadas es muy baja, de 4 a 30 lb (18 a 130 N). Este factor debe considerarse importante durante el manejo e instalación de las geomembranas. Extremo cuidado debe observarse durante la construcción, cuando se mueven equipos y objetos pesados sobre las mismas. Así mismo, debe considerarse el viento cuando tenga velocidades altas. En geomembranas reforzadas se nota la ayuda que brinda éste durante las maniobras antes citadas. El rango de valores de resistencia al rasgado para geomembranas reforzadas varía notablemente de 20 a 100 lb (90 a 450N).

Resistencia al impacto: La caída de objetos, incluyendo materiales punzo-cortantes, pueden penetrar la geomembrana provocando agujeros o debilitamiento de la zona, la cual puede ser un punto de propagación de desgarre no deseado. Por lo tanto, una valoración de la resistencia al impacto de la geomembrana es necesaria. Existen varias opciones: ASTM D 1709, D 3029, D 1822, D 746 y D 3998. Se recomienda usar la adaptación de impacto de Spencer de la prueba de desgarre Elmendorf, ASTM D 1424. Las geomembranas más gruesas tienen mejor resistencia al impacto que las delgadas. El efecto de la tela de refuerzo no es significativo comparado con las que no lo tienen, sin embargo, si existe diferencia entre los diferentes tipos de geomembranas. También se realizan pruebas a geomembrana con geotextiles, sobre, debajo o entre estos.

Resistencia al punzonamiento: Las geomembranas colocadas sobre suelos rocosos, ramas u otros objetos puntiagudos, son vulnerables de pincharse, punzonarse durante y después de las cargas que se les imponen. Este punzonamiento es de vital importancia, ya que ocurre una vez que la geomembrana ha sido cubierta y no puede detectarse hasta que una fuga se hace obvia en el sistema. Los costos de reparación de este tipo de falla son cuantiosos. La prueba que más asemeja esta situación es la ASTM D 5494, pero una alternativa para medir la resistencia al punzonamiento es la D 4833 (prueba sugerida por los fabricantes para evaluar la resistencia al punzonamiento de todos los geosintéticos). Valores típicos de resistencia al punzonamiento para geomembranas delgadas, no reforzadas varían de 10 a 100 lb (45 a 450 N); y 50 a 500 lb (220 a 2,200 N) para geomembranas reforzadas. Nuevamente, la influencia del refuerzo es notable. Colocar un geotextil debajo y/o arriba de una geomembrana no reforzada, incrementa mucho la resistencia al punzonamiento de la geomembrana y esencialmente absorbe toda la carga antes de que la geomembrana se percate de la misma. Por otra parte, se sigue investigando al respecto del comportamiento de la geomembrana una vez colocada en el sitio final, con diferentes condiciones de carga y apoyo.

Fricción de la geomembrana: Un factor crítico en el diseño de revestimientos de geomembrana en laderas de rellenos, embalses, canales, etcétera, es la fricción entre el sistema suelo-geomembrana. Como lo menciona Boschuk, numerosas fallas en laderas han ocurrido. Frecuentemente, los suelos que cubren la geomembrana se deslizan sobre ésta, pero algunas veces la geomembrana falla (o se desprende del anclaje de zanja o trinchera), moviéndose sobre una superficie de menor fricción debajo de ella. Este método de prueba es una adaptación de la ingeniería geotécnica, tomado de la prueba de corte para determinar la fricción de suelo-suelo. Varias condiciones deben cumplirse para obtener resultados realistas:

- Degradación y tipo de suelo a emplear
- Densidad y contenido de humedad del suelo donde se colocará
- Condiciones de humedad durante la prueba (seco, húmedo, saturado)
- Aplicación de esfuerzo normal
- Tasa de esfuerzo a usar durante el corte
- El esfuerzo total debe evaluarse

Se debe considerar el tamaño de la caja de corte, pues existen diferentes medidas. Koerner (1995) recomienda el uso de cajas de corte de 4 x 4 in (100 x 100 mm) para geomembranas en contacto con arena, arcilla o limos. Sólo si se prueban materiales con partículas mayores o se utilizan geomembranas con textura burda, la caja de corte deberá ser más grande. Esta decisión la tomará el ingeniero a cargo del diseño. Desgraciadamente, la prueba ASTM D 5321 relativa a la evaluación de corte directo en geosintéticos sobre suelo, o geosintéticos sobre geosintéticos, recomienda una caja de corte de 12 x 12 in (300 x 300 mm) para todos los casos. Mientras que ese tipo de caja es apropiada para la prueba de corte de geomalla o georred, es de un tamaño inadecuado para varias situaciones prácticas.

Los valores de eficiencia de las siguientes tablas están dados por la siguiente relación:

$$E = \tan \delta / \tan \Phi$$

donde Φ = ángulo de fricción del suelo
 δ = ángulo de fricción de la geomembrana respecto a la superficie opuesta

El comportamiento a la fricción de geomembranas colocadas sobre suelos arcillosos es de considerable importancia en los revestimientos compuestos de rellenos de residuos sólidos.

A continuación se muestran algunos valores de fricción y eficiencias (entre paréntesis) en varios casos:

Tabla 4.5 Ángulos de fricción suelo-geomembrana

Geomembrana	Tipo de suelo		
	Arena para concreto ($\Phi = 30^\circ$)	Arena de Ottawa ($\Phi = 28^\circ$)	Arena de esquisto Micha ($\Phi = 26^\circ$)
EPDM-R	24° (0.77)	20° (0.68)	24° (0.91)
PVC áspero	27° (0.88)		25° (0.96)
PVC suave	25° (0.81)		21° (0.79)
CSPE-R	25° (0.81)	21° (0.72)	23° (0.87)
HDPE	18° (0.56)	18° (0.61)	17° (0.63)

Tabla 4.6 Ángulos de fricción geomembrana-geotextil

Geotextil	Geomembrana				
	EPDM-R	PVC áspero	PVC suave	CSPE-R	HDPE
No tejido, punzonado	23°	23°	21°	15°	8°
No tejido, termosellado	18°	20°	18°	21°	11°
Tejido, monofilamento	17°	11°	10°	9°	6°
Tejido, película en corte	21°	28°	24°	13°	10°

Tabla 4.7 Ángulos de fricción suelo-geotextil

Geotextil	Tipo de suelo		
	Arena para concreto ($\Phi = 30^\circ$)	Arena de Ottawa ($\Phi = 28^\circ$)	Arena de esquisto Micha ($\Phi = 26^\circ$)
No tejido, punzonado	30° (1.00)	26° (0.92)	25° (0.96)
No tejido, termosellado	26° (0.84)		
Tejido, monofilamento	26° (0.84)		
Tejido, película en corte	24° (0.77)	24° (0.84)	23° (0.87)

Anclaje de la geomembrana: En algunas soluciones problemáticas, es posible encontrar una geomembrana como sandwich entre dos materiales y tensionada por una fuerza externa. Tal es el caso de una terminación de revestimiento con geomembrana dentro de un anclaje tipo trinchera. El procedimiento completo y detalles de esta prueba está disponible como GRI Método de prueba GM2. Para propósitos de diseño, se busca la profundidad de anclaje necesaria para movilizar cierta parte de la resistencia de la geomembrana.

Tensión de fisuramiento o agrietamiento (banda doblada): Llamado también "tensión de fisuramiento ambiental" en la prueba ASTM D 1693, sólo aplicable a materiales de polietileno. Más aún, mientras mayor sea la densidad (cristalinidad), más relevante es la prueba. Se prepara una muestra pequeña con una imperfección controlada en una de sus caras, que consiste en una muesca aproximadamente a la mitad del espesor que corre hacia el centro en el sentido longitudinal. La muestra se dobla en forma de "U" y se coloca dentro de las pestañas de un canal sostenedor. Después, este arreglo se sumerge en un agente húmedo y se eleva la temperatura usualmente hasta 122 °F (50 °C).

La tensión al fisuramiento se define como: "una fractura externa o interna en un plástico provocada por un esfuerzo de tensión menor que su propia resistencia mecánica a corto plazo"; por lo que la prueba registra la proporción de un total de muestras que se fisuran en un tiempo dado. Por lo general, las especificaciones de geomembranas lo mencionan como número cero de muestras fisuradas por tensión en 1,500 horas. Esta prueba no es muy estimulante para las geomembranas, debido a la habilidad de las muestras de relajarse a la tensión durante la misma. Existe una prueba nueva y más alentadora para evaluar esta propiedad en placas elaboradas de resina *pellet* (masa comprimida) y de hojas y uniones de geomembranas, el cual se describe a continuación.

Tensión de fisuración (carga constante): Este tipo de prueba aplicable a geomembranas de polietileno, ha sido aprobada por el Comité D 35 de la ASTM y es llamada prueba de carga constante de tensión cortada (NCTL del inglés, *notched constant tension load*) designada en ASTM D 5397. Coloca muestras en forma de pesa bajo carga constante (a un porcentaje conocido de su presión de fluencia) en un agente húmedo y a temperatura elevada. Igepal es comúnmente el agente húmedo y 122 °F (50 °C) la temperatura habitual. Cuando una serie de muestras se evalúan a diferentes porcentajes de su presión de fluencia, un comportamiento dúctil-a-frágil es indicado.

Al evaluar 18 tipos de geomembranas vírgenes de HDPE comercialmente disponibles, se observó que el tiempo de transición varía de 10 a 5000 horas. Adicionalmente, siete muestras exhumadas de geomembranas de HDPE colocadas en campo, que tenían problemas de fisuración por tensión fueron evaluadas. Sus tiempos de transición variaron de 4 a 97 horas. La recomendación actual para una resistencia aceptable de fisuración por tensión en geomembranas de HDPE es de 100 horas. Las pruebas pueden efectuarse en muestras de placas elaboradas de la resina base y con el mismo acabado de las hojas de geomembranas.

4.4.3 Propiedades de durabilidad

Varios fenómenos que provocan el rompimiento de las cadenas dentro de la estructura polimérica de una geomembrana deben considerarse en detrimento del comportamiento a largo plazo. Existen muchos factores a considerar en este aspecto, como lo son las características del sitio específico de disposición final de la geomembrana, la tendencia general de comportamiento es generar que el polímero se vuelva frágil en su comportamiento de esfuerzo-deformación a través del tiempo. Por lo tanto, las propiedades que más deben monitorearse son los tipos de degradación que sufre el polímero con el tiempo y son:

- Decremento en elongación hasta la falla
- Incremento en la tensión hasta la falla (por tanto decremento en la resistencia)
- Incremento en el módulo de elasticidad
- Pérdida general de ductilidad

Degradación radioactiva: La luz solar provoca un efecto de degradación importante en todos los materiales orgánicos, incluyendo los polímeros de los cuales se elaboran los geosintéticos. Es de interés para el tema, saber que la energía del sol se puede descomponer en tres partes:

- Infrarrojo (longitudes de onda mayor a 760 nm)
- Visible (longitudes de onda entre 400 y 760 nm)
- Ultravioleta (UV) (longitudes de onda menores a 400 nm)

La parte Ultravioleta se subdivide en UV-A (400 a 315 nm), que provoca algunos daños a polímeros; UV-B (315 a 280 nm) que origina severos daños a polímeros; y UV-C (280 a 100 nm), que se encuentra sólo en el espacio exterior. De verano a invierno existen cambios tanto en la intensidad como en el espectro de la luz solar. Lo más significativo es la pérdida de radiación de las longitudes de onda más cortas durante el invierno. Obviamente la localización geográfica, temperatura, capa de nubes, viento y humedad son también factores importantes en el proceso de degradación por rayos UV en polímeros y deben tomarse en cuenta en la realización de cualquier método de prueba. Las simulaciones de laboratorio son, en el mejor de los casos, difíciles pero no menos importantes. La literatura menciona que el polietileno es más sensible a la degradación UV alrededor de 300 nm, el poliéster cerca de los 325 nm, y el polipropileno alrededor de los 370 nm.

La energía de las ondas cortas de la luz solar puede penetrar en la estructura polimérica, causando rompimiento de las cadenas. En virtud de la diferencia de superficies entre geotextiles y geomembranas, el grado relativo de degradación UV en geomembranas es mucho menor que en los geotextiles. Por lo tanto, las cubiertas temporales para geomembranas antes de colocarlas no son generalmente necesarias desde el punto de vista de este fenómeno.

Cabe señalar, que todos los polímeros usados para geosintéticos incluyen negro de carbón o pigmentos (2% a 25%) para actuar como agentes pantalla o bloqueadores que minimizan los efectos por degradación UV (Véase tabla 4.1). Más aún, muchos polímeros contienen estabilizadores químicos contra los rayos UV como parte del paquete de aditivos. Entonces, las cubiertas temporales de geomembranas, las cuales se observan en muchas especificaciones, son preferentemente incluidas desde el punto de vista de protección contra daño accidental o intencional de la geomembrana, más que por degradación UV. Las pruebas disponibles son varias, entre las cuales están: ASTM G26 y G53. Otras pruebas auxiliares son la ASTM D 1435 y D 4364. Garantías hasta de 20 años se han logrado obtener por parte del fabricante en ciertas situaciones para geomembranas de CSPE-R y HDPE.

Degradación radioactiva: Generalmente se ha acordado que una radioactividad mayor a 10^6 a 10^7 rads, causará degradación polimérica, por lo que es deseable que en la contención de desperdicios con alto nivel radioactivo no se utilice geomembranas. Cuando se tienen niveles bajos de radioactividad si se pueden utilizar sistemas de contención con geomembranas. Algunas aplicaciones se han dado con uranio. Existe poca información disponible respecto a este tema, debido a limitaciones político-gubernamentales.

Degradación biológica: Existe un número inmenso de organismos vivos en el suelo. El área de peligros biológicos para geomembranas es vasta y sólo se le ha dado un vistazo. Este tipo de degradación abarca la de animales como ratas y ratones (esmalte de sus dientes depositados en madrigueras y garras), desafortunadamente no existe prueba alguna para evaluar este tipo de daño, sólo la intuición

para determinar el espesor y tipo de geomembrana a utilizar. La excepción es el caso de geomembranas con gran cantidad de plastificantes y aquellas que usan almidones y proteínas en sus componentes. Es posible que el animal se vuelva adicto a los plastificantes, y en el otro caso que utilicen la geomembrana como alimento. Afortunadamente, los almidones y proteínas son en la actualidad poco usados en los compuestos de geomembranas.

Otro aspecto es la resistencia a hongos (levaduras, moho, champiñones o setas), depende de la materia orgánica (carbón, nitrógeno y otros elementos). Su número puede ser muy grande, de 10 a 20 millones por gramo en suelo seco y su población cambia constantemente. Colocar una geomembrana en residuos orgánicos en descomposición causa preocupación. Sin embargo, el alto peso molecular de los polímeros generalmente usados para geomembranas parece ser muy insensible a tal degradación. La prueba ASTM G21 trata la resistencia de los plásticos a los hongos. Pero la real preocupación es la posibilidad de que depósitos de hongos taponen o bloqueen el flujo a través y dentro de los geotextiles, geomallas y geocompuestos de drenaje, los cuales están frecuentemente asociados a las geomembranas.

Otro factor es la resistencia a bacterias, que son organismos de célula simple, dentro de la más simple y pequeña forma de vida conocida. Es raro que excedan 5 μm de longitud y son generalmente redondas, en forma de bastoncillo o espiral. Su número es enorme, más de un billón por gramo de suelo. Participan en todas las transformaciones orgánicas, por lo que lo discutido anteriormente para hongos se repite. El método de prueba para evaluar la resistencia a las bacterias de los plásticos es ASTM G22. Como en el caso anterior, la mayor preocupación es el taponamiento u obstrucción de los sistemas de drenaje empleados en combinación con geomembranas.

Degradación química: La resistencia química de una geomembrana respecto a una sustancia y principalmente poder contenerla, es siempre de interés y muy frecuentemente es el aspecto más crítico para el proceso de diseño. Por ejemplo, en el caso de la contención de residuos domésticos o peligrosos, el contaminante estará en contacto directo con la geomembrana, por lo que la resistencia de ésta debe garantizarse durante el tiempo de vida del proyecto.

Este aspecto ha sido reconocido por los fabricantes (véase ASTM D 543), quienes han evaluado diversas situaciones. Se han generado listas de compatibilidad, de resistencia química, etcétera; las cuales deben ser consideradas con cautela, según sea el caso, ya que existen diversos factores que influyen en los resultados, como si la sustancia química no es simple, cuyos efectos sinérgicos se desconocen; cuando el compuesto químico final es desconocido como los lixiviados; cuando la geomembrana es modificada en las uniones o se junta con materiales diferentes al de aquella, etcétera.

Degradación térmica (Calor, frío, expansión térmica): Varias propiedades de las geomembranas poliméricas son sensitivas a cambios por temperatura. Ambas, temperaturas cálidas y frías tienen sus propios efectos únicos.

Comportamiento con temperatura cálida: Los materiales de que están hechas las geomembranas expuestos al calor, sufrirán cambios en propiedades físicas, mecánicas o químicas. El tiempo y severidad de exposición determina la extensión de este cambio. Si el cambio ocurre, puede darse por la volatilidad de humedad, solventes o plastificantes. Al tiempo que tratan de aliviar los esfuerzos residuales, promueven enlaces cruzados y posibles cambios en color o apariencia. La prueba ASTM D 794 cubre las recomendaciones prácticas al respecto. Se recomienda también un método tubular, el ASTM D 1870, cuya muestra permite la circulación de aire. Los materiales elastoméricos no son tan sensitivos al calor como los plásticos.

La falla por calor se define como "un cambio en la apariencia, peso, dimensiones u otras propiedades, que alteran al material a tal grado que ya no es aceptable para el servicio en cuestión".

Comportamiento con temperatura fría: Las pruebas para evaluar los efectos del frío en geomembranas siguen los lineamientos generales que los efectos por calor, pero el comportamiento del material es, por supuesto, completamente diferente. Por lo general, el frío no degradará a la geomembrana de manera apreciable, al menos bajo temperaturas normalmente habituales. Las geomembranas han sido instaladas con éxito en el ártico y su servicio ha sido adecuado. El efecto más significativo del frío en la construcción del sistema, es la pérdida de flexibilidad y que las juntas son más difíciles de hacer, lo cual es un factor importante. Se deberá tener excesivo cuidado al efectuar el proceso de unión entre lienzos de geomembranas, para garantizar el buen funcionamiento del sistema.

Coefficiente de expansión térmica: Existen numerosos procedimientos para determinar el coeficiente térmico de expansión o contracción de un material; por ejemplo, ASTM D 2102 y D 2259 para contracción, D 1042 y D 1204 para expansión y cambios dimensionales. Todos ellos someten a la muestra a una fuente constante de frío o calor y miden cuidadosamente la distancia de separación entre dos puntos iniciales dados.

Degradación por oxidación: Siempre que un radical libre se forme, el oxígeno puede crear progresivamente degradación a través del tiempo. El oxígeno se combina con el radical libre para formar un radical hidroperóxido, el cual pasa alrededor y dentro de la estructura molecular. Eventualmente, reaccionará con otra cadena de polímero, creando un nuevo radical. Aditivos antioxidantes se agregan a la fórmula, para equilibrar estos radicales libres o al menos interferir con el proceso de su formación. Estos aditivos o estabilizadores son específicos para cada tipo de resina. Esta área es sofisticada y avanzada, pues involucra a los fabricantes. Remover el oxígeno de la superficie de la geomembrana, por supuesto que elimina la posibilidad de degradación. Por tanto, una vez colocada y cubierta con desperdicios o líquido, la degradación por oxidación deberá ser muy retardada. Las geomembranas expuestas o cubiertas con suelo no saturado, serán proporcionalmente más susceptibles a este fenómeno. La oxidación de los polímeros, causará eventualmente degradación, quizás después de cientos de años, aún en ausencia de otros tipos de degradación.

Cabe señalar que es común en la práctica que dos o más mecanismos de degradación actúen simultáneamente (rellenos sanitarios-lixiviados-gases); por lo que deben considerarse con cuidado al evaluar y predecir el tiempo de vida útil de una geomembrana en un sistema dado.

4.5 Métodos de prueba aceptados por la industria

A continuación se mencionarán otras especificaciones, prácticas y métodos de prueba de la ASTM, que se aplican a geomembranas:

Especificaciones:

D 3083-89	Láminas flexibles de plástico (PVC) para el revestimiento de lago, canal y depósito
D 4885-88 (1995)	Determinación de la resistencia de funcionamiento de geomembranas mediante el método de tensión de tira ancha. (descontinuado en 1966 por la ASTM)
D 3020-89	Láminas plásticas de polietileno y etileno (copolímeros) para el revestimiento de lago, canal y depósito

D 4833-88 (1996) ^{Et}	Índice de la resistencia a la perforación de geotextiles, geomembranas y productos relacionados
--------------------------------	---

Prácticas:

D 5323-92	Determinación del módulo secante al 2% para geomembranas de polietileno
D 4545-86 (1991)	Determinación de la integridad de las uniones de factoría usadas en geomembranas de láminas flexibles
D 4437-84 (1988)	Determinación de la integridad de las uniones en obra usadas en geomembranas de láminas flexibles
D 5820-95	Evaluación del canal de aire a presión de geomembranas de unión doble
D 5721-95	Envejecimiento por horno de aire de las geomembranas de poliolefina
D 5747-95 ^a	Pruebas para evaluar la resistencia química a los líquidos de las geomembranas

Métodos de prueba:

D 5994-98	Determinación del espesor del núcleo de geomembrana texturizadas
D 6214-97	Determinación de la integridad de las costuras en la obra usadas en la unión de geomembranas mediante el método de fusión química
D 5514-94	Prueba en gran escala de perforación hidrostática de geosintéticos
D 5494-93	Determinación de la resistencia trapezoidal a la perforación de geomembranas protegidas y sin protección
D 5884-95	Determinación de la resistencia al desgarre de geomembranas internamente reforzadas
D 5596-94	Evaluación microscópica de la dispersión de carbón negro en geosintéticos de poliolefina
D 5397-95	Evaluación de la resistencia al esfuerzo de agrietamiento de geomembranas de poliolefina usando la prueba de carga de tensión constante no confinada
D 5262-97	Evaluación del comportamiento de la fluencia de los geosintéticos bajo tensión no confinada

Guías:

D 5819-98	Seleccionando métodos de ensayos para la evaluación experimental de durabilidad de geosintéticos
D 5886-95	Selección de los métodos de prueba para determinar la velocidad de la permeación de fluidos a través de geomembranas para aplicaciones específicas

4.6 Métodos de unión o de empalme de geomembranas

Las juntas entre secciones de membranas pueden hacerse recurriendo a diferentes técnicas, el objetivo principal es asegurar la impermeabilidad y resistencia de la zona de unión entre los dos lienzos. Las uniones realizadas en planta son más confiables que las efectuadas en el campo, donde no existen las condiciones óptimas requeridas para hacer este trabajo. Es importante señalar, que la selección inadecuada del método de unión y material a emplear en su caso, disminuye considerablemente la posibilidad de que todo el sistema funcione correctamente. Debido a lo anterior, se recomienda la aplicación de sistemas de aseguramiento y control de calidad en esta etapa del proyecto.

Siempre debe buscarse minimizar el número de juntas a realizar en campo. Para seleccionar el método de unión se aconseja analizar las características de los materiales de fabricación de las geomembranas, de esta forma es posible entender por qué los diferentes métodos son o no aplicables. La metodología para la realización de todos los tipos de uniones en campo, coincide con la adecuada preparación y colocación de la geomembrana y el sistema general de control de calidad.

Si se enlistaran los aspectos más importantes de la construcción con geomembranas, las uniones deberían encabezar la lista. Sin duda, sin una adecuada unión (costura o junta), el concepto de utilizar un revestimiento de geomembrana o barrera de líquido o vapor es tonto. Algunas veces, en la fábrica, hojas de geomembranas son unidas a otras para proporcionar una geomembrana más larga (PVC, CSPE-R); es de esperarse que estas uniones sean excelentes, pues se realizaron en un ambiente controlado y limpio con buen control de calidad.

El mecanismo fundamental de unión de lienzos de geomembranas consiste en reorganizar temporalmente la estructura polimérica de las dos superficies a unir de manera controlada (fundir o suavizar), de tal forma que después de aplicar presión y dejar pasar cierto tiempo, el resultado es la unión de los lienzos. La reorganización polimérica es provocada por la aplicación de energía que origina procesos térmicos o químicos, que a su vez pueden involucrar la adición de un polímero en la zona de unión. Idealmente, la unión de dos geomembranas debería ser tal que no se pierda resistencia a la tensión a lo largo de las dos hojas, y cuya unión genere un comportamiento monolítico de las geomembranas. No obstante, debido a las concentraciones de esfuerzos resultado de la geometría irregular de las uniones, las técnicas de unión actuales conceden una disminución relativa de resistencia a la tensión a la geomembrana unida.

Cabe señalar, que todas las juntas o uniones elaboradas independientemente de la técnica empleada, deberán ser revisadas con sistemas de control de calidad y aseguramiento, a fin de poder garantizar la estanqueidad total del trabajo.

A continuación se presentan los principales métodos de unión de juntas empleados en la actualidad:

Métodos térmicos

Extrusión:

- Tipo filete
- Tipo uniforme (plana)

Fusión:

- Cuña caliente
- Aire caliente

Dieléctrico

Métodos químicos

Solvente:

- Solvente de fusión
- Solvente integral de fusión

Adhesivo:

- Solvente adhesivo
- Adhesivo de contacto

4.6.1 Métodos térmicos

Método dieléctrico o de soldaduras por alta frecuencia

Este método se basa en la transmisión de ondas de alta energía y frecuencia, en el intervalo de 30 a 40 MHz, a través del traslape de los dos tramos a unir. Entre dos y cinco segundos, mediante la energía de alta frecuencia se genera el suficiente calor, para que el material se vuelva termoplástico de ambas caras del traslape y fluya, después se presiona uniformemente de manera que resulte una unión homogénea e instantánea. Esta técnica se utiliza únicamente en planta. Se aplica al PVC y al hypalon, pero no al EPDM ni al neopreno.

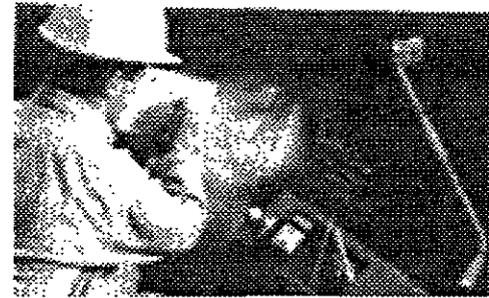


Figura 4.19 Método dieléctrico

Extrusión

Este método se emplea exclusivamente en geomembranas de polietileno (HDPE y VLDPE), se coloca polímero fundido en forma de cordón (llamado también soldadura), estirándolo sobre los bordes o entre las superficies que se han de unir. El polímero fundido provoca que las superficies a unir se calienten y se fundan, después de lo cual se enfrían y se unen. El método es llamado extrusión tipo filete, cuando el polímero fundido se coloca sobre el borde principal de la unión; y es llamado extrusión tipo uniforme cuando el polímero se coloca entre los dos lienzos a unir. La extrusión tipo filete es el único método para juntar parches de geomembranas de polietileno en áreas poco accesibles (zonas muy pequeñas, uniones de tubos, etcétera). La temperatura y velocidad de unión juegan un papel importante para obtener una buena junta.

El equipo empleado es: generador de energía, esmeril con tallador (cuya función es tallar o lijar la zona donde se colocará la soldadura de polímero) y los dispositivos de aire caliente para la extrusión. El rendimiento alcanzado por los equipos varía de 0.30 a 2.0 m/min. Las extrusoras portátiles realizan al mismo tiempo las siguientes operaciones: calentamiento, incorporación del cordón, fusión y presión.

Se recomienda evitar que se generen altas temperaturas sobre los lienzos (se sugiere colocar alguna base aislante entre el equipo y las geomembranas). Se revisará que no haya gotas del polímero fundido

o daños sobre la capa geomembrana. Se observará que la extrusión del polímero tenga textura uniforme, que esté alineada y con espesor suficiente. Si hay burbujas o picaduras puede deberse a presencia de humedad, polvo o pequeños trozos de polímero; en este caso se debe parchar la zona con tiras de geomembrana que excedan en 15 cm cada lado de la parte dañada.

Termofusión

Existen dos mecanismos de fusión térmica o unión por fundido (ablandar), los cuales pueden usarse en todas las geomembranas termoplásticas. En ambos, porciones de las superficies a unir son realmente fundidas, en estos casos, la temperatura, la presión y velocidad de unión son factores decisivos, ya que un exceso de ablandamiento debilita la geomembrana y una inadecuada fundición genera una unión pobre de resistencia. No se requiere aporte de material para llevar a cabo la unión.

El proceso de cuña caliente consiste en una resistencia eléctrica en forma de cuña, la cual se desliza entre los dos lienzos de geomembrana a unir. Mientras se funde la superficie de contacto, un flujo cortante ocurre a lo largo de las superficies del borde superior e inferior.

Se aplica entonces un rodillo de presión uniformemente, de modo que los dos lienzos converjan en la punta del borde para formar la junta final homogénea e instantánea. Es necesario un control riguroso de: la temperatura en las zonas de contacto, la presión del rodillo y del tiempo de aplicación de ambos (velocidad de la máquina), también se recomienda observar los factores ambientales (humedad, temperatura, viento, etcétera.). Un exceso de calor o de presión puede debilitar localmente la geomembrana y favorecer roturas posteriores por tensión.

Este método no puede aplicarse a membranas gruesas (por ejemplo de más de 1 mm). Es esencialmente un método aplicable en planta. Sin embargo, se han desarrollado equipos para usarlo en el campo, en particular con el hule butilo y el 3110. El punto de fusión del polietileno tiene un intervalo demasiado reducido de variación, por lo que la unión con calor de este tipo de películas es un proceso extremadamente difícil de controlar.

Existen equipos automáticos que ajustan la temperatura, presión y velocidad de fusión. Un equipo estándar crea una unión simple uniforme, pero también se puede hacer una unión doble con un equipo dual o split, que origina dos juntas paralelas con un espacio uniforme entre ellas (conducto intermedio o canal de comprobación). Este espacio puede emplearse para evaluar la calidad y continuidad de la junta, al aplicar aire a presión monitoreando cualquier pérdida de presión, que implica una falla de la junta.

El proceso de unión dual es más aconsejable para soldaduras de gran longitud, por tener mejor resistencia al desgarramiento y por la facilidad de obtener una comprobación total del éxito de la soldadura.



Figura 4.20 Equipo dual (doble cordura con canal de comprobación)

El rendimiento de los equipos varía de 1.0 a 4 m/min o menores dependiendo de las condiciones climatológicas. En este método las superficies de las geomembranas deben estar limpias, sin lijar; se verificará que la cuña del aparato no tenga partes filosas; en caso de ser dual, se verificará la separación especificada y que los rodillos sean uniformes, lisos y biselados en los bordes y que generen la presión suficiente. Se cuidará el avance del equipo, ya que los lienzos pueden dañarse si quedan atrapados.

El método de aire caliente emplea un aparato que consiste en un calentador de resistencia, un soplador, y controles de temperatura que forzan el paso de aire caliente entre dos lienzos para fundir las superficies opuestas. Inmediatamente después de fundirlas, se aplica la presión necesaria con rodillos al área de junta para unir los dos lienzos. Como en el proceso de cuña caliente, también se pueden producir uniones sencillas o dobles.

En situaciones específicas, se emplea esta técnica para la fusión remendada temporal de dos lienzos, hasta que la junta final sea elaborada y aceptada. Los equipos de aire caliente son de tipo manual y automático, de aire o de algún tipo de gas; en caso de ser de este último tipo, se debe garantizar el suministro y sitio adecuado de almacenamiento para el gas. Se recomienda revisar las boquillas de los equipos para ver que no estén dañadas o rotas y se verificará que generen la presión necesaria.

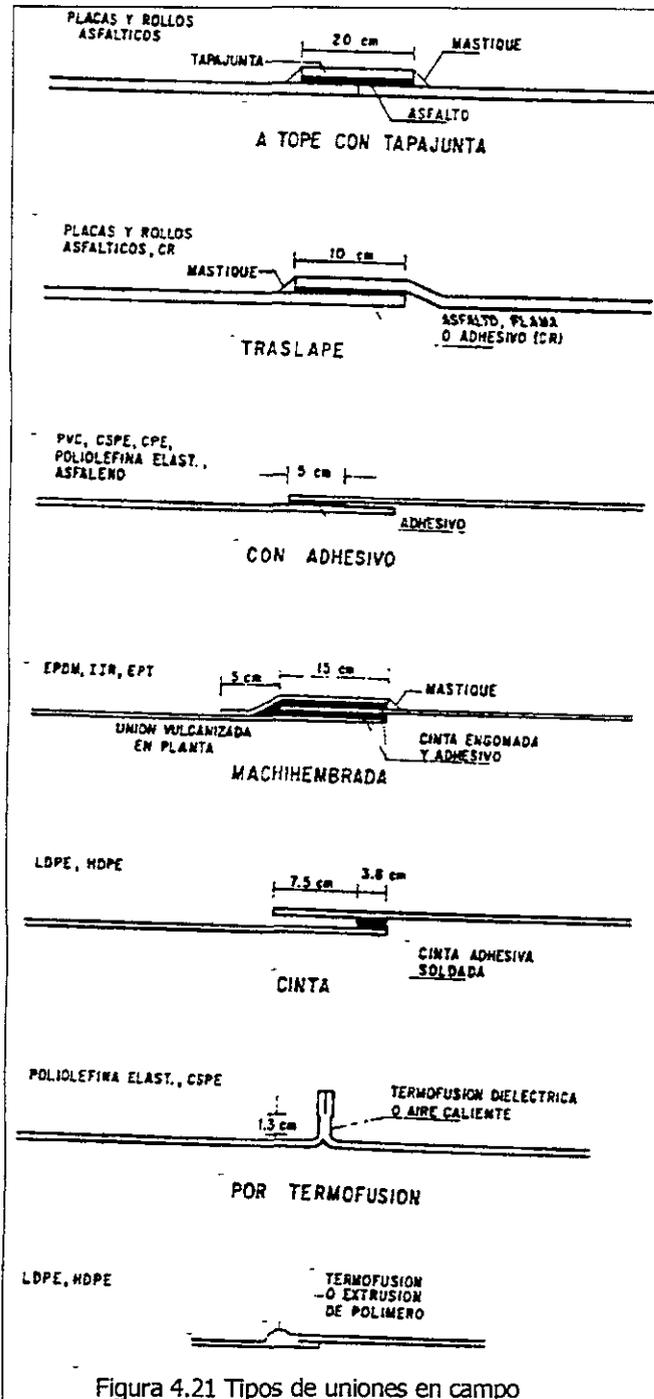


Figura 4.21 Tipos de uniones en campo

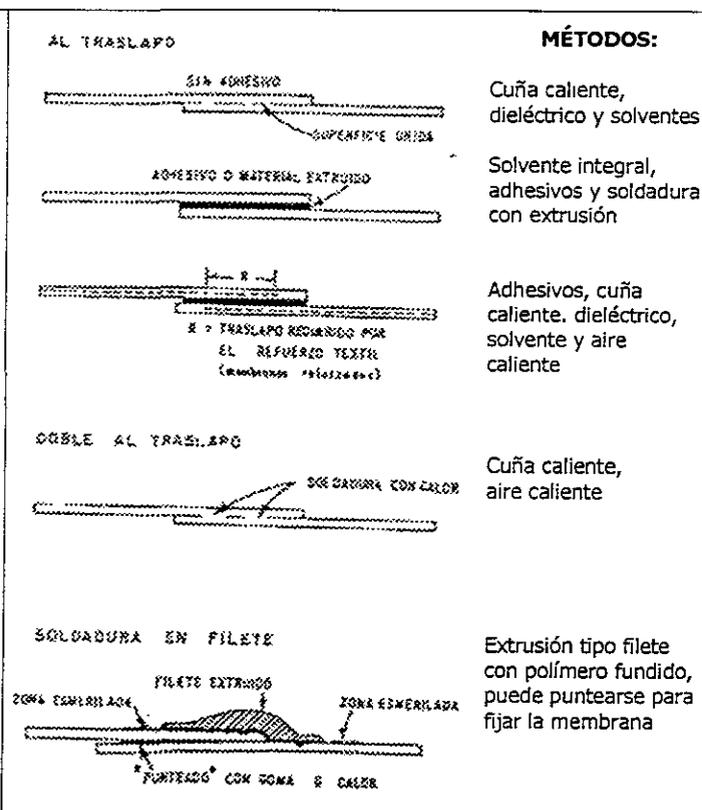


Figura 4.22 Diferentes tipos de unión

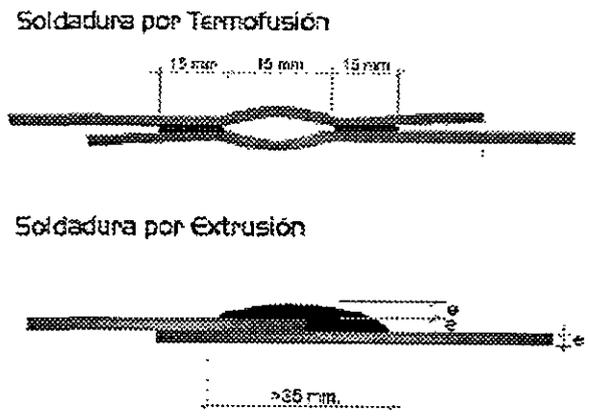


Figura 4.23 Tipos de unión para membranas de PEAD

4.6.2 Métodos químicos

Unión con solvente

Las uniones con solvente por fusión utilizan un líquido solvente que se aplica entre los dos lienzos de geomembranas a unir. Después de unos segundos, la superficie se ablanda y se aplica presión para completar el contacto de los lienzos y el proceso de unión.

Como en cualquier otro proceso de unión con solvente, una porción de los dos materiales adyacentes a unir, se transforman completamente a una fase viscosa. El producto metil-etil-ketone (MEK) es usualmente utilizado para este fin. Para poder usar este método, se requiere contar con un producto que pueda disolver el material constitutivo de la geomembrana. Las superficies atacadas por el solvente se ponen en contacto y al evaporarse el solvente, se obtiene la junta deseada. Los problemas que pueden surgir, están relacionados con la existencia de zonas locales donde la acción del solvente no es suficiente y, con la disolución no controlada de la membrana o de la tela de refuerzo que puede ocurrir al usar cantidades excesivas de solvente. Esta técnica se usa tanto en planta como en el campo, en particular para películas de PVC.

Las uniones de tipo solvente integral de fusión son similares a las anteriores, excepto en que de 1% a 20% de la resina básica o compuesto de la geomembrana se disuelve en el solvente y después éste se usa para elaborar la unión o junta. El propósito de añadir esta resina o compuesto es incrementar la viscosidad del líquido para el trabajo de traslape y/o ajustar la velocidad de evaporación del solvente. Este líquido viscoso se aplica entre las dos superficies opuestas de los lienzos a unir. Después de unos segundos se aplica presión para uniformizar el contacto. Si es necesario, se puede usar aire caliente para eliminar las burbujas en la junta.

El equipo y material utilizado es: líquido solvente, brochas de cerdas resistentes al solvente, cantidad suficiente de trapos y limpiadores para cuando sea necesario retirar los excesos del solvente, guantes, rodillo (madera, hule o acero según se requiera). A bajas temperaturas es necesario aplicar calor a las geomembranas con algún sistema de aire caliente, antes de colocar el solvente.

Unión con adhesivos

El método de unión con solventes adhesivos, utiliza un agente adherente que se disuelve en el solvente o solvente integral, el cual se aplica después de que la junta ha sido completada y curada. Por lo tanto, el adherente es un elemento adicional en el sistema. El equipo es similar al antes citado.

El proceso de unión con adhesivos de contacto (cintas) consiste en aplicar agentes de unión en ambas caras de los lienzos. Después de alcanzar un apropiado grado de pegajosidad, los dos lienzos se colocan uno encima del otro, seguido de rodillos de presión. El adhesivo forma la unión y es un elemento adicional en el sistema.

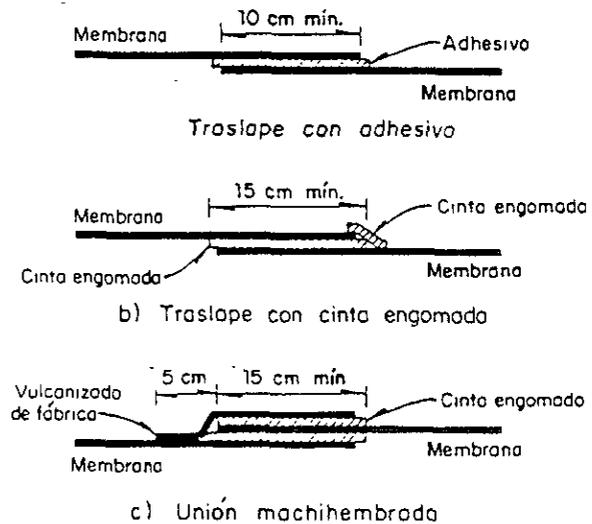


Figura 4.24 Uniones con sistemas adhesivos

Se usan diferentes tipos de adhesivos, incluyendo las resinas epóxicas de dos ingredientes y sistemas basados en cintas adhesivas. En la figura 4.24 se muestran diferentes juntas que pueden realizarse con adhesivos. La técnica de las cintas adhesivas se aplica frecuentemente a las geomembranas de polietileno. Sin embargo, las juntas obtenidas no pueden considerarse permanentes; además, las cintas adhesivas no tienen la misma resistencia a los productos químicos y a los solventes que el propio polietileno. A excepción de los paneles asfálticos, todas las uniones hechas en el campo deben ser perpendiculares al pie del talud. Sin embargo, las uniones de alta resistencia como las que se consiguen con algunas formulaciones de hypalon y de 3110 se pueden colocar en cualquier dirección.

Por otra parte, los métodos utilizados para el sellado de las geomembranas asfálticas son: flama o placas calientes, con o sin suministro de asfaltos en estado líquido o mastiques asfálticos.

Tabla 4.8 Métodos de unión para varios tipos de geomembranas

Método de unión	HDPE	VLDPE	PVC	CSPE-R	EIA-R	LLDPE	PP	CPE
Extrusión (tipo filete y uniforme)	A	A	N	N	N	A	A	N
Fusión (cuña y aire caliente)	A	A	A	A	A	A	A	A
Solventes (solvente y solvente integral)	N	N	A	A	A	N	N	A
Adhesivo (solvente y contacto)	N	N	A	A	A	N	N	A

A= Método aplicable, N= No aplica el método

4.6.3 Comprobación de uniones, soldaduras o juntas

Es aconsejable realizar una comprobación del 100% de las soldaduras efectuadas entre geomembranas. Existen varios procedimientos de comprobación, además del visual directo, cuando se realiza la soldadura a "cara vista".

Prueba de vacío

Se aplica previamente en la soldadura agua jabonosa. Se presiona una campana de vacío (vacuómetro) sobre la zona a comprobar, de manera que quede la base adherida a las zonas próximas a la unión. En caso de defecto, pasará aire a través del poro, lo que se detecta por la presencia de una pompa.

Prueba del potenciómetro

Esta prueba se realiza en las soldaduras realizadas por extrusión. Previamente a la realización del aporte del material y en la generatriz de unión, se introduce un hilo de cobre bajo el cordón, de manera que quede totalmente recubierto. Se pueden determinar los defectos de la soldadura, con la aplicación de un potenciómetro, que a través del poro y por diferencia de potencial hace saltar la chispa ante la presencia de un poro o defecto de la soldadura.

Prueba por destrucción de probetas

La prueba consiste en tomar muestras de la zona de soldadura y ensayarlas por tensión hasta rotura en un laboratorio homologado, o en la obra con la ayuda de un tensómetro de campo. Todas las probetas de ensayo a rotura, tienen dimensiones estándar establecidas por las normas correspondientes.

Prueba con aire comprimido

Usada para comprobar la soldadura de doble fusión con ayuda del conducto intermedio. Se introduce por uno de los extremos de la soldadura un "pitón" ó una aguja que se conecta a la manguera de un compresor de aire comprimido intercalando un manómetro. Se aplica una presión constante (2.5 kg/cm²) y se observa si la aguja del manómetro permanece quieta durante 15 minutos.

En caso de descenso de la aguja, habrá certeza de la existencia de un defecto que se detecta por el ruido del aire al salir.

4.7 Aplicaciones

Una razón del auge actual de las geomembranas, es debido a la generación de reglamentaciones gubernamentales en algunos países relativas al manejo, almacenamiento y desecho de residuos domésticos, industriales y peligrosos; por lo que la protección del suelo, agua y en general del medio ambiente es entonces, la función principal de las geomembranas.

En virtud de lo anterior, se puede decir que el objetivo fundamental al utilizar geomembranas es impedir la migración de partículas o fluidos (gas o líquido); y se distinguen dos funciones principales:

- Barrera impermeable, cuando la membrana está confinada entre dos materiales sólidos,
- Recubrimiento cuando se coloca en la interfase de dos suelos o revestimiento superficial cuando se colocan cerca o sobre la superficie.

Un relleno sanitario y en general cualquier sistema de disposición de residuos, necesita un amplio estudio de las técnicas de impermeabilización susceptibles de emplearse.

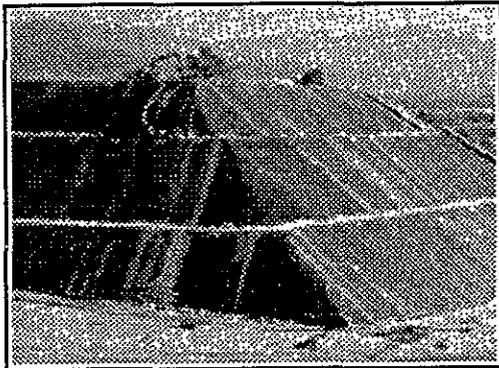


Figura 4.25 Revestimiento superficial de un relleno en Puente Hills, N.V.

Las normas de países industrializados requieren que el sustrato de la base y lados del relleno ofrezca valores máximos del coeficiente de permeabilidad ($k = 1.0 \times 10^{-9}$ m/s). La obtención de dichos factores es factible con arcillas naturales, pero se necesitan espesores del orden de metros (las normas europeas requieren de un mínimo de tres metros) que, cuando no se trate de suelos naturalmente impermeables, se vuelven factores considerables de costo económico y ambiental. Las geomembranas representan una alternativa respecto a las arcillas, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En México, los usos principales de las geomembranas han sido para evitar la pérdida de líquidos, la disolución del terreno, la contaminación de suelos o acuíferos y como protección contra erosión superficial.

Cabe señalar, como se ha dicho antes, que no existe material alguno que sea totalmente impermeable, pues aún las geomembranas tienen una reducida permeabilidad por difusión, además, pueden existir fugas debido a defectos de fabricación (microagujeros), perforaciones producidas durante el transporte, colocación (piedras) o en la operación de la obra (herramienta que cae sobre la geomembrana, equipo pesado), así como juntas o uniones defectuosas por las cuales puede escapar un caudal importante del fluido que se pretende contener.

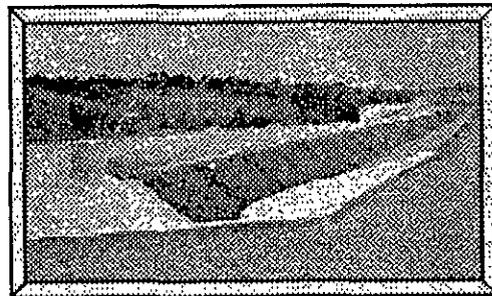


Figura 4.26 Revestimiento de un canal

Actualmente, existen herramientas matemáticas para determinar la magnitud de esas pérdidas, así mismo, se han mejorado los procedimientos para detectar defectos en el sellado de juntas durante la construcción, mediante la aplicación de jabonadura y cajas de vacío sobre las juntas, aire comprimido, etcétera; además de implantarse programas de aseguramiento de la calidad muy rigurosos, que incluyen la verificación de la resistencia de las zonas selladas mediante pruebas destructivas y un programa amplio de muestreo.

Afortunadamente, existen casos donde una impermeabilidad total no es absolutamente indispensable, a excepción de aquellos casos donde:

- Las fugas causen contaminación intolerable del agua subterránea o del subsuelo.
- Las fugas causen el deterioro de la estructura del suelo que sostiene a la geomembrana, lo que pone en peligro la integridad del revestimiento sintético y la operación del sitio.

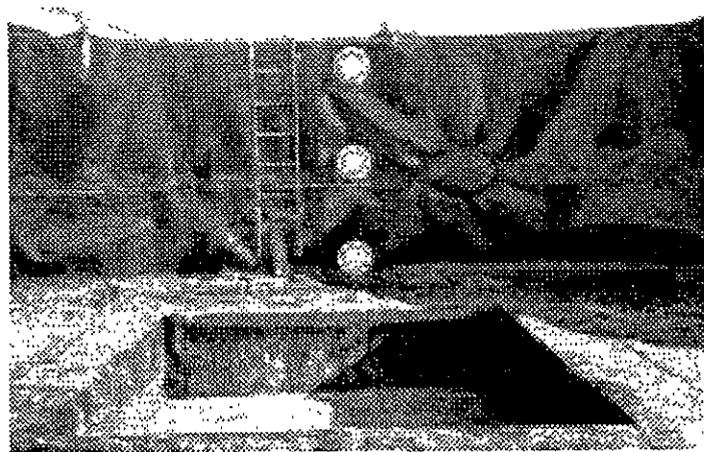
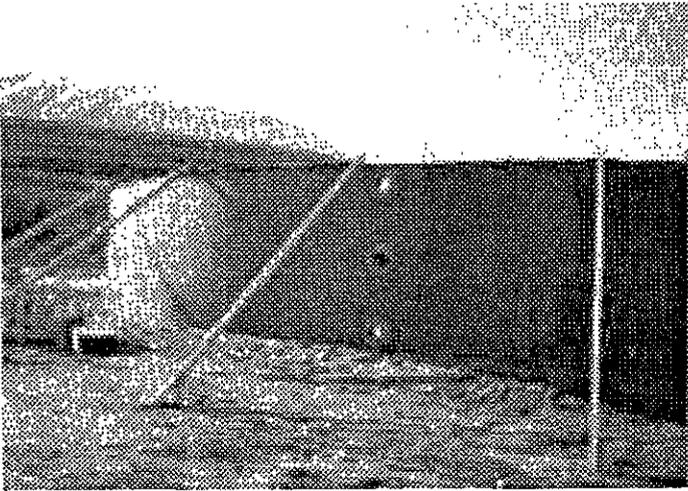
En virtud de lo anterior, y tomando en cuenta que no existe material totalmente impermeable, lo que se debe buscar es la impermeabilidad del sistema; lo cual se logra a través de un diseño especial de drenaje, donde el sistema de contención sí tendrá fugas, pero éstas no llegarán al suelo.

Clasificación de los defectos

Recordemos que las discontinuidades de los geoproductos continuos son debidas a defectos de fabricación, daños durante la instalación u operación y uniones defectuosas entre las hojas. De acuerdo con Giroud y Bonaparte, los defectos se clasifican en:

- Microagujeros, cuando su diámetro es menor al espesor de la membrana ($d < T_g$),
- Agujeros pequeños, con diámetro medio de 2 mm y
- Agujeros grandes, con diámetro medio de 11.3 mm.

Para efectos de análisis, se requiere determinar el diámetro medio y frecuencia de los microagujeros. Se puede considerar un microagujero por cada 4 000 m² con dos tamaños posibles: grande con superficie de 1 cm², para cálculo individual de las dimensiones de los elementos del sistema colector de filtraciones y un agujero pequeño con superficie de 0.031 cm², para el diseño general del sistema de subdrenaje, cuando éste exista. Estas frecuencias son considerando un buen control de calidad en la fabricación, colocación y conservación de la geomembrana. Cuando no se realiza un control adecuado, sobretodo en la instalación y sellado de uniones, es posible una frecuencia mayor, de un agujero por cada 400 m².



5. USO Y APLICACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS

5. USO Y APLICACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS

5.1 Métodos de diseño

Existen varios métodos de diseño para cualquier material a utilizar, los cuales se pueden usar para alcanzar la selección final del material adecuado. Para los geotextiles y productos relacionados los métodos más comunes son:

- Diseño por experiencia
- Diseño por especificación
- Diseño por función

El diseño por **experiencia** utiliza un proceso de selección basado en la experiencia personal o de otros. Es obvio que este tipo de diseño es muy subjetivo y relativo, en función del tipo de experiencia de la persona responsable, de la calidad de su experiencia y de su criterio; por lo que no se recomienda para personas nuevas en el campo. Este método es típico de los fabricantes y sus representantes, quienes tienen una experiencia considerable en el área. La División de Geotextiles de la IFAI (Asociación Internacional de Telas Industriales del inglés) es la indicada para obtener este tipo de información.

El diseño por **especificación** consiste en la aplicación de criterios de aceptación de los geosintéticos, publicados por organismos afines de reconocida experiencia en el manejo de dichos productos. Al respecto, en otras partes del mundo ya existen grupos de trabajo multidisciplinarios, cuyo fin es dar a conocer las especificaciones del producto en cuestión (geotextiles y geomembranas principalmente). En muchos casos, estos grupos son constituidos por representantes de organismos gubernamentales, consultores, universidades, fabricantes, etcétera.

Cabe señalar, que muchos de estos criterios de aceptación se basan en correlaciones empíricas de resultados obtenidos en aplicaciones reales con las propiedades de los materiales empleados. Para el caso en cuestión, se recomienda verificar varios aspectos importantes antes de adoptar alguno de dichos criterios, tales como conocer la integración del grupo de trabajo que emite las especificaciones para comprobar que existe equilibrio de intereses y que la especificación incluye propiedades relacionadas con el uso, más que las características de un producto en especial; que la especificación se relacione apropiadamente con la aplicación en consideración, que los métodos de prueba se puedan realizar con el equipo disponible, etcétera.

En Estados Unidos, la mayoría de las agencias gubernamentales llevan a cabo el diseño por especificación, así como otros usuarios de geotextiles para aplicaciones de rutina. Frecuentemente consiste en una matriz de propiedades, donde se listan las aplicaciones comunes junto con los valores mínimos de las propiedades requeridas (en ocasiones máximos), para casos generales. Este tipo de especificaciones usualmente reflejan experiencias locales y condiciones particulares de campo. Otras agencias públicas tienen especificaciones similares, las cuales muestran sus necesidades particulares y deseos.

Por ejemplo, el grupo de trabajo 25 (*Task Force 25*) está constituido por representantes de AASHTO y de dos organizaciones de contratistas de carreteras de los EUA. Cuentan con consultores técnicos de diferentes universidades, de la Estación Experimental *Waterways* del Cuerpo de Ingenieros y de asociaciones de fabricantes de textiles.

AASHTO está representada por miembros de *The Federal Highway Administration* (FHWA), los Departamentos de Transporte de los Estados de California, Nuevo México y Nueva York y por el Consejo de Investigación de Carreteras y Transportación del Estado de Virginia.

El diseño por **función** es un concepto moderno para realizar diseños de sistemas geotécnicos que incluyen geosintéticos (geotextiles principalmente), se basa en criterios usuales de ingeniería y en la función principal del producto, lo que permite calcular el factor de seguridad global a partir de valores permisibles para determinada propiedad del geosintético y los valores requeridos de esa propiedad, de acuerdo a ciertos métodos de cálculo. La relación de dichos valores nos proporciona el factor de seguridad global, el cual debe ser mayor que uno y se compara con el factor de seguridad deseado. Qué tanto por encima del valor uno, dependerá de lo crítico de la situación, de la percepción del diseñador como podrían ser las consecuencias de una falla, el propio método de prueba y del modelo de diseño. Los modelos de diseño se basan en métodos de análisis limitados y tal vez conservadores, en comparación con las condiciones existentes durante la vida útil del geosintético.

Los valores permisibles son las propiedades del geoproducto que se consideran en el diseño, mismos que pueden ser obtenidos mediante pruebas de laboratorio que reflejen la situación actual. Los valores requeridos se obtienen mediante cálculos usuales para sistemas tradicionales que han sido modificados para incorporar la contribución del geosintético, apoyados en modelos de diseño.

Este tipo de diseño es muy diferente del diseño por especificación, en el que se consideran al azar parámetros del producto en cuestión (usualmente propiedades índice), los cuales son especificados sin considerar los parámetros de influencia presentes en el sitio donde se colocarán los productos. Lo anterior puede acarrear una inadecuada selección del material, lo que probablemente llevará a la falla, propiciando así una mala reputación de los productos geosintéticos. Cabe señalar que R. Koerner experto en geotextiles de la Universidad de Drexel, reconoce la importancia del diseño por función, además ha contribuido intensamente en la integración de los mismos en la mecánica de suelos tradicional y en la ingeniería de cimentaciones.

El diseño por función es aplicable a la mayoría de las situaciones encontradas en la práctica. En general, el proceso consiste en los siguientes pasos secuenciales:

1. Determinar la función primaria del geosintético,
2. Calcular, estimar o de otra manera determinar el valor requerido de la función primaria del geosintético,
3. Probar o de otra forma obtener el valor permisible de la propiedad del prospecto geosintético,
4. Calcular el factor de seguridad global como sigue:

$$FS = \frac{\text{valor permisible (prueba)}}{\text{valor requerido (diseño)}} \quad \dots \text{ecuación 5.1}$$

5. Determinar si el valor resultante del factor de seguridad global es lo suficientemente alto para las condiciones particulares del sitio en consideración.

Las funciones primarias a tomar en cuenta son indistintamente separación, refuerzo, filtración, drenaje, protección e impermeabilización.

Cuando la aplicación no sea dominada por una función primaria, no tenga un modelo de diseño desarrollado o permitido, o no cuente con un método de prueba realista, se recomienda aplicar el método de diseño por experiencia. Por otra parte, el diseño por función acorde a la tradición en ingeniería, ha desplazado en forma amplia el inicial método de diseño por producto, que no permite una comparación entre distintas marcas e impide evaluar las probables respuestas mecánicas e hidráulicas a las solicitaciones impuestas.

El esquema de cálculo que se muestra a continuación es una ordenación lógica de pasos a seguir para el dimensionamiento de geotextiles en la mecánica de suelos y se basa en el concepto de diseño por función.

Esquema de cálculo para la especificación de geotextiles

1. Análisis del proyecto
 - Tipo de problema
 - Posibilidad de utilizar geotextiles: si/no
2. Definir el factor de seguridad mínimo deseable, dependiendo de lo crítico de la situación (consecuencias de una falla, etcétera)
3. Determinación de las funciones primaria y secundarias del geotextil
 - Separación
 - Filtración
 - Drenaje
 - Refuerzo
 - Protección
 - Impermeabilización
4. Cálculo numérico del valor de la propiedad requerida del geotextil en cuestión, de acuerdo con la función principal asignada (considerando los parámetros de frontera y las condiciones in situ):
 - Suelo Distribución granulométrica
 - Resistencia al corte
 - Permeabilidad
 - Agua Condiciones de flujo (velocidad, dirección, cantidad)
 - Presión Estática
 - Dinámica
5. Determinación de los valores mínimos permisibles de las propiedades del geotextil candidato, según la función principal:
 - Mecánicas Resistencia a la perforación
 - Resistencia a la rotura (tensión-elongación) (Mullen Burst)
 - Resistencia al desgarre
 - Resistencia a la tensión
 - Hidráulicas Permeabilidad (horizontal y vertical), K_h y k_v
 - Tamaño de abertura eficaz del geotextil, D_w
 - Tamaño de abertura aparente, AOS
 - Velocidad de flujo, q_v
 - Estabilidad Química-biológica
 - Estabilidad UV

6. Cálculo del factor de seguridad relacionando el valor de la propiedad permisible (paso 5) entre el valor de la propiedad requerida (paso 4) para obtener el factor de seguridad global (ecuación 5.1).
7. Comparación del factor de seguridad global con respecto al factor de seguridad mínimo deseable (punto 2).
8. Si no es aceptable, se buscarán otros geotextiles con propiedades más adecuadas.
9. Si el factor de seguridad global es lo suficientemente mayor a uno, el geotextil candidato es aceptable y se verificará si no existe una función secundaria que sea más crítica.
10. Repetición del proceso para otros geotextiles disponibles y si más de uno satisface el requerimiento del factor de seguridad global, entonces la selección se apoyará en otras consideraciones como el menor costo y disponibilidad.

En aquellas aplicaciones que no tienen relación directa con la mecánica de suelos, por ejemplo, revestimientos de protección, puede mantenerse el esquema de cálculo mediante la sustitución de las condiciones de frontera (punto 4 del esquema de cálculo).

Los factores de seguridad a elegir deben coincidir con los valores normalmente utilizados en la mecánica de suelos, dada la falta de factores de seguridad estandarizados para geotextiles.

Una de los problemas del diseño por función es que se requiere contar con información suficiente de las propiedades de los materiales, recuérdese que los geosintéticos son productos relativamente nuevos que aún se encuentran en etapas de desarrollo y normalización, mientras que el número de métodos para determinar propiedades índice es mucho mayor. Otra limitante es que aún existen algunas funciones, por ejemplo de geotextiles, para las cuales se han postulado teorías del funcionamiento, pero no existe consenso de cuál es la más correcta; éste puede ser el caso de la filtración. Sin embargo, el diseño por función es probablemente el método más fácil para asegurar una buena selección de diseño.

Muchos de los métodos de prueba para obtención de las propiedades de los geotextiles representan condiciones ideales, por lo que es frecuente encontrar valores altos de éstas en el diseño. Como se ha expresado, el diseño por función utiliza el factor de seguridad global de acuerdo con valores de pruebas permisibles, de esta manera el valor particular no puede utilizarse directamente de la prueba de laboratorio por lo que se modifica sutilmente para las condiciones *in situ*. Esto podría realizarse de forma directa durante el proceso de prueba, modelando la situación real por completo, lo cual no es posible en la mayoría de los casos. Para acreditar la diferencia entre los valores de prueba de laboratorio y los valores deseables de comportamiento, se han expresado las siguientes aproximaciones:

- Aplicar un muy elevado factor de seguridad global al final del problema.
- Utilizar factores de seguridad parciales generados de los valores de las pruebas de laboratorio, para convertirlos en un valor permisible de una situación específica.

Por ejemplo, para el caso de determinación de la resistencia a la tensión de un geotextil (modificada), para compensar la falta de representatividad de las condiciones de campo de la prueba mediante la cual se hace la determinación, el valor que se obtiene mediante dicha prueba se modifica como sigue para obtener la resistencia a la tensión permisible:

$$T_{perm} = T_{ult} \left(\frac{1}{FS_{di} \cdot FS_e \cdot FS_{dq} \cdot FS_{db}} \right) \quad \dots \text{ecuación 5.2}$$

- donde T_{perm} = valor permisible que se utilizaría en la ecuación 5.1 en el numerador
 T_{ult} = resultado obtenido durante la prueba, el cual se desea corregir
 FS_{di} = factor de seguridad parcial por daños de instalación
 FS_e = factor de seguridad parcial por elongación a largo plazo (Creep)
 FS_{dq} = factor de seguridad parcial por degradación química
 FS_{db} = factor de seguridad parcial por degradación biológica

El ejemplo es aplicable a otras propiedades mecánicas relacionadas con las áreas de aplicación de la siguiente tabla 5.1 y otras semejantes. Es obvio que este tipo de corrección es arbitrario, pero se utiliza a falta de datos adecuados. Se recomienda tener mucha precaución al emplear este método de corrección.

Tabla 5.1 Factores de seguridad parciales para utilizarlos en la ecuación 5.2 (Koerner 1994)

Aplicación	Daño por instalación	Creep* (elongación a largo plazo)	Degradación química	Degradación biológica
Separación	1.1 a 2.5	1.5 a 2.5	1.0 a 1.5	1.0 a 1.2
Protección	1.1 a 2.0	1.2 a 1.5	1.0 a 2.0	1.0 a 1.2
Caminos sin pavimentar	1.1 a 2.0	1.5 a 2.5	1.0 a 1.5	1.0 a 1.2
Muros de retención	1.1 a 2.0	2.0 a 4.0	1.0 a 1.5	1.0 a 1.3
Terraplenes	1.1 a 2.0	2.0 a 3.5	1.0 a 1.5	1.0 a 1.3
Capacidad de carga	1.1 a 2.0	2.0 a 4.0	1.0 a 1.5	1.0 a 1.3
Estabilización de taludes	1.1 a 1.5	2.0 a 3.0	1.0 a 1.5	1.0 a 1.3
Revestimiento de pavimentos	1.1 a 1.5	1.0 a 2.0	1.0 a 1.5	1.0 a 1.1
Ferrocarriles	1.5 a 3.0	1.0 a 1.5	1.5 a 2.0	1.0 a 1.2
Formas flexibles	1.1 a 1.5	1.5 a 3.0	1.0 a 1.5	1.0 a 1.1
Barrera de limos	1.1 a 1.5	1.5 a 2.5	1.0 a 1.5	1.0 a 1.1

*El valor mínimo del rango se refiere a aplicaciones que tienen un tiempo relativamente corto de servicio y/o situaciones en las cuales las deformaciones creep no son significativas con respecto al funcionamiento total del sistema en cuestión.

5.1.1 Ejemplos de diseños por función

Ejemplo 1 (Koerner)

Para el subdren de una carretera, construido con grava mal graduada que rodea a un tubo perforado, determinar si un geotextil de tipo entrelazado mecánico con $k=0.381$ cm/s, espesor $t=0.114$ cm y AOS equivalente a la malla 100 US estándar, es adecuado para manejar el flujo esperado que será de 147 cm³/s. El geotextil deberá evitar que las partículas del suelo, que es un limo arenoso con $d_{10}=0.006$ mm, $CU=5.5$, $k=1.31 \times 10^{-3}$ cm/s y se encuentra en un estado de compacidad intermedia de 85%, penetre los espacios abiertos de la grava y reduzca su permeabilidad.

Solución:

- Condición de suficiente permeabilidad

$$q = k i a = k \frac{\Delta H}{t} \cdot A$$

Primero es necesario calcular la permisividad requerida ψ_{req} en el sistema de donde :

$$\psi_{req} = \frac{k}{t} = \frac{q}{\Delta H A} = \frac{0.000147}{(0.5)(0.3 \times 1)}$$

$$\psi_{req} = 0.00098 \text{ s}^{-1}$$

Ahora se debe calcular la permisividad que posee el geotextil:

$$\psi_{req} = \frac{k_{geotextil}}{t_{geotextil}} = \frac{0.381 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{0.114 \text{ cm}} = 3.34 \text{ s}^{-1}$$

Este factor se debe corregir por daños de instalación, elongación a largo plazo, deterioro químico y deterioro biológico, de acuerdo a la ecuación 5.2

$$\psi_{perm} = 3.34 \left(\frac{1}{(2)(1.5)(2.5)(1.1)} \right) = \frac{3.34}{8.25} = 0.4 \text{ s}^{-1}$$

Con lo anterior, es posible calcular el factor de seguridad:

$$FS = \frac{\psi_{perm}}{\psi_{req}} = \frac{0.40}{0.00098} = 408$$

Por lo que se concluye que el geotextil propuesto es adecuado para el caso de suficiente permeabilidad.

2. Condición de retención

La contaminación puede llevarse a cabo con el limo arenoso que compone el suelo. Se aplicará el criterio siguiente propuesto por Giroud:

$$O_{95} < 18 d_{50}/CU \quad \text{y} \quad CU = d_{60}/d_{10}$$

$$\text{Por lo tanto:} \quad d_{60} = (5.5) (0.006) = 0.033 \text{ mm}$$

Y por aproximación, se establece que $d_{50} = 0.030 \text{ mm}$ y aplicando el criterio seleccionado se tiene que:

$$O_{95} < (18) (0.03)/5.5$$

$$O_{95} < 0.098 \text{ mm}$$

El número de malla con abertura más próxima a la obtenida corresponde al No. 140, equivalente a 0.106 mm; así. AOS del geotextil debe ser el No. 140 o un número mayor. Como AOS de dicho material es el número 100 ($O_{95} = 0.15 \text{ mm}$), se concluye que es necesario optar por otro geotextil que cumpla con la condición de retención indicada.

Ejemplo 2

A continuación se reproduce el cálculo efectuado para diseñar un muro de contención elaborado para marcar la colindancia de un fraccionamiento particular en Lomas de Bezares, México, D.F. a fines del año de 1985. El diseño se realizó siguiendo los lineamientos proporcionados por Steward *et al* (1978) de acuerdo a las experiencias obtenidas en la región 6 del Servicio Forestal de los E.U.A., donde en 1974 y 1975 se instrumentaron dos muros de contención construidos mediante la técnica conocida como encapsulado, que se muestra esquemáticamente en la figura siguiente:

- Z = altura hasta la corona del muro
- d = altura desde la corona del muro hasta donde de efectúa el cálculo
- X = espesor de la cápsula que se calcula
- L_f = longitud de anclaje por fricción
- L_t = longitud de traslape del textil
- L = longitud total de la zona rellena
- AB = plano de falla
- θ = ángulo del plano de falla = $45^\circ + \Phi/2$

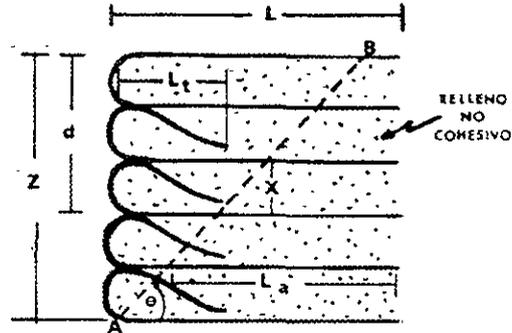


Figura 5.1 Esquema conceptual de un muro de contención construido mediante encapsulado de suelo con geotextiles.

Los muros se construyeron utilizando como relleno material granular, con sólo 2.9% de contenido de material que pasa la malla 200, encapsulados con geotextiles de relativamente baja resistencia y alta elongación, formando un total de 21 cápsulas distribuidas, desde la parte inferior a la corona del muro en 6 cápsulas de 23 cm, 4 de 30, 4 de 23 y finalmente 7 de 30 cm, para una altura total de 5.6 m más el espesor de la base del camino cuyo ancho de corona fue completado justamente con el relleno confinado por el encapsulado. El tráfico que usaba el camino consistía de camiones de ejes tándem duales de 18 toneladas.

Las secciones instrumentadas utilizaron inclinómetros horizontales y verticales, medidores de asentamientos de inductancia y otros aparatos de medición; de los resultados de la instrumentación se observó que no sucedieron movimientos verticales en el muro y sólo se registraron ligeros movimientos en el relleno. A pesar de que se esperaban desplazamientos horizontales de importancia por las características de los geotextiles utilizados, sólo se presentaron desplazamientos de 6.10 mm a 51.8 mm dentro de los 0.9 m de relleno próximo al frente del muro; dichos movimientos fueron atribuidos a deslizamientos del suelo de cimentación (el muro se construyó en una ladera) o a redistribución del relleno cerca del frente del muro, donde se aplicó menor compactación al construir. Todos los movimientos registrados sucedieron entre el sexto y dieciochoavo mes después de finalizada la obra.

Tomando como base el método de cálculo empleado para la construcción de las estructuras mencionadas, que utiliza el método de Rankine considerando que los empujes laterales se desarrollan por las presiones del relleno contenido más la carga estática de automóviles estacionados a 0.50 m de distancia del frente del muro, se desarrollaron los siguientes cálculos: Datos. Altura total del muro: 5 m. Relleno de limo arenoso de baja plasticidad, con peso volumétrico de 1 800 kg/m³ y ángulo de fricción de 23°.

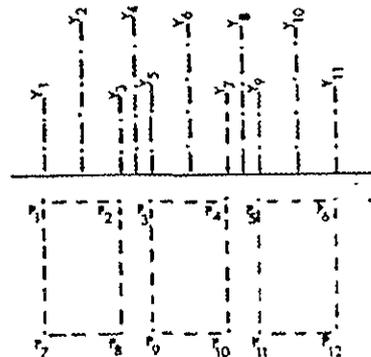


Figura 5.2 Planta de estacionamiento y diagrama de puntos de determinación de empujes de carga viva.

La carga estática se genera por automóviles de 1 300 kg ubicados en 3 cajones de estacionamiento, distribuidos de acuerdo a la figura 5.2. El muro se diseñó totalmente vertical, a pesar de que por fines prácticos de la construcción se pensaba proporcionar cierta inclinación al mismo, para facilitar la operación de colocación y compactación del relleno sin recurrir al uso de cimbra.

a) El cálculo de la presión de tierra se efectuó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\sigma_{h_d} = K_0 \gamma_m d \quad \text{ecuación 5.3}$$

donde σ_{h_d} es la presión de tierra en kg/m^2 , K_0 es el coeficiente de presión de tierra en reposo, γ_m es el peso volumétrico del relleno y d es la altura del mismo en m.

b) La presión originada por la carga viva se determinó empleando la siguiente ecuación (Spangler, 1951):

$$\sigma_{h_1} = P X^2 \frac{Z}{R^5} \quad \text{ecuación 5.4}$$

donde σ_{h_1} es la presión perpendicular al muro, originada por la carga viva, en kg/m^2 , P es el valor de la carga aplicada, correspondiente a los vehículos que circulan por el área de estacionamiento, sobre el muro que se calcula. X , Z y R son parte del sistema de coordenadas utilizado para ubicar los puntos donde se desea calcular la presión lateral ejercida perpendicularmente al muro, originada por la carga P de modo que:

$$R = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad \text{ecuación 5.5}$$

La figura 5. indica esquemáticamente el significado de cada una de las variables mostradas en la ecuación 5.5.

Para detectar los puntos sobre el muro donde la presión lateral provocada por las llantas de los 3 automóviles es más intensa, se calcularon mediante la ecuación 5.4 las presiones laterales a 12 diferentes profundidades en los puntos donde los planos Y_0 a Y_6 intersectan al eje del muro (véase figura 5.3). Los valores más altos se sumaron a las presiones laterales originadas por el relleno, obteniéndose la siguiente tabla de presiones laterales totales sobre el muro.

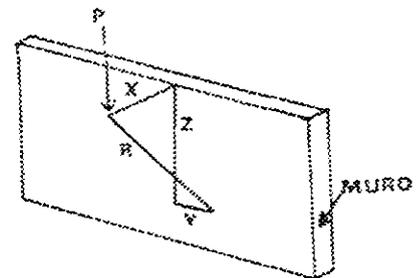
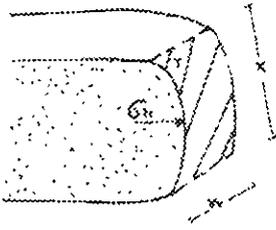


Figura 5.3 Diagrama de cargas vivas sobre el muro y componentes de empuje lateral.

Tabla 5.2 Muro Bezares. Presiones totales actuantes

Z (m)	$\sigma_{h_T}(\text{kgf/m}^2)$
0.3	765
0.6	910
0.9	1 108
1.2	1 383
1.5	1 691
1.8	2 008
2.4	2 655
3.0	3 306
3.6	3 959
5.0	5 489



c) Cálculo de la ubicación del refuerzo

En el sistema de encapsulado, se considera que los empujes laterales de tierra son soportados por la tensión de la franja de geotextil, de acuerdo con lo siguiente:

Figura 5.4 Consideraciones de empujes laterales

Para un ancho unitario W de geotextil se tiene que:

$$T = \sigma_{h_T} X \quad \text{ecuación 5.6}$$

donde T es la resistencia a la tracción del refuerzo y X es la altura de la cápsula de textil. σ_{h_T} es el empuje lateral total a la altura X/2. La ecuación 5.6 debe ser corregida para incluir un factor de seguridad que depende del grado de confiabilidad de la prueba utilizada para determinar T. Steward *et al* recomiendan un factor de seguridad por este concepto de 1.5 a 1.75. Al emplearse para el cálculo la resistencia del material utilizado (Tytar 3401), determinada de acuerdo a la prueba recomendada por los investigadores mencionados, que es ensaye denominado "Cilindro del Estado de Oregon", versión modificada de la prueba Proctor para suelos con adaptaciones para fijar el geotextil, se seleccionó el factor de seguridad más bajo del rango recomendado. Por lo anterior, la determinación del espaciamiento de las cápsulas se determinó de acuerdo a:

$$X = \frac{T}{(\sigma_{h_T})(FS)} \quad \text{ecuación 5.7}$$

Al sustituir valores, la ecuación 5.7 se transforma en:

$$X = \frac{1072 \frac{\text{kg}}{\text{m}}}{1.5 \sigma_{h_T}} = \frac{714}{\sigma_{h_T}} \text{ m}$$

los resultados, una vez redondeados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5.3 Concentración de resultados y diseño definitivo del Muro Bezares

No. cápsula	Espesor de cápsula X, (m)	Niveles, (m)	Longitud de anclaje, (m)
1	0.10	5.0 a 4.9	0.40
2	0.10	4.9 a 4.8	0.40
3	0.10	4.8 a 4.7	0.40
4	0.15	4.7 a 4.55	0.40
5	0.15	4.55 a 4.4	0.50
6	0.15	4.4 a 4.25	0.50
7	0.20	4.25 a 4.05	0.50
8	0.20	4.05 a 3.85	0.50
9	0.20	3.85 a 3.65	0.50
10	0.30	3.65 a 3.35	0.50
11	0.30	3.35 a 3.05	0.60
12	0.30	3.05 a 2.75	0.70
13	0.40	2.75 a 2.35	0.70
14	0.40	2.35 a 1.95	0.80
15	0.40	1.95 a 1.55	0.80
16	0.40	1.55 a 1.15	1.00
17	0.40	1.15 a 0.75	1.20
18	0.40	0.75 a 0.00	1.70

- d) Como el refuerzo es movilizado por fricción con el suelo, el siguiente paso fue la determinación de la longitud de geotextil que debe quedar anclado dentro de la zona pasiva de la estructura, evitando que el refuerzo sea jalado hacia afuera.

$$P_a = 2 d \gamma \tan \frac{2}{3} \Phi L_a \quad \text{ecuación 5.8}$$

En la ecuación anterior, P_a es la resistencia a que el refuerzo sea jalado hacia afuera de la estructura, que para fines de diseño se iguala con la resistencia a la tracción del geotextil; d es la distancia vertical a la que se encuentra el refuerzo, T es el peso volumétrico del suelo, Φ es el ángulo de fricción interna del suelo y L_a es la longitud de anclaje determinada desde el plano de falla hacia la zona pasiva del muro.

En este cálculo se encuentra implícito otro factor de seguridad, pues $\frac{2}{3} \Phi$ es el ángulo de fricción del geotextil con el suelo, lo cual implica una eficiencia del 66.6% en fricción con respecto al suelo sin refuerzo. Pruebas hechas por Martin *et al* (1984) muestran que la eficiencia en fricción del geotextil Typar utilizado, es del 86.6% en arena y similares pruebas efectuadas en el Tecnológico de Georgia con dicho geotextil en contacto con suelo muestran resultados altos en comparación a la fricción entre el mismo suelo y grava. Los valores de 0.40 y 0.42 respectivamente, muestran una eficiencia del 95%. La longitud de anclaje se afectó adicionalmente por un factor de seguridad de 1.75, procediéndose como sigue:

$$L_a = \frac{P_a (FS)}{2 d \gamma \tan 0.666 \Phi} \quad \text{ecuación 5.9}$$

$$L_a = \frac{1072 (1.75)}{2 d (1800) (0.2679)} = \frac{1.945}{d} \text{ m}$$

Los resultados obtenidos, redondeados, se detallan en la tabla 5.3.

- e) La determinación de la longitud de traslape L_t se determinó por la ecuación 5.10

$$L_t = \frac{\sigma_{h_r} X (FS)}{2 \gamma_d \tan 0.666 \Phi} \quad \text{ecuación 5.10}$$

Se empleó un factor de seguridad de 1.75, obteniéndose longitudes de anclaje de 0.20 a 0.9 m que resultaban demasiado cortas para fines prácticos, por lo que la cifra se redondeó a 1 m para todas las cápsulas. La construcción se realizó en diciembre de 1985, dejando una inclinación al muro para facilitar la compactación de las capas de relleno.

Mediante traveses apoyadas en el muro así construido, se sostiene una barda de tabique que marca la colindancia del fraccionamiento. La distancia entre el muro reforzado y la barda se dejó vacía y sobre el relleno se coló una losa de concreto a manera de tapa. El área correspondiente al trabajo aquí descrito finalmente se empleó para un jardín en lugar del estacionamiento.

Figura 5.5 Última capa de relleno terminada y geotextil a punto de cerrar la cápsula. Se observan las traveses y la barda que se apoya en el muro.



5.2 Parámetros de diseño para geotextiles

En esta sección se hará énfasis en los diferentes parámetros a considerar para cada aplicación principal de los geotextiles y para las geomembranas, ya que en los capítulos anteriores se ha hablado de sus diferentes usos.

Como se ha dicho, el empleo de los geotextiles en los diferentes campos de aplicación puede definirse mediante sus funciones. Por lo anterior, se muestra en la página siguiente la tabla 5.4 donde se expresan las funciones principales de los geotextiles dependiendo de la aplicación, las cuales son separación, filtración, drenaje, refuerzo, protección e impermeabilización.

Se dará especial importancia a la función principal del geotextil que representa la base del dimensionamiento según el concepto de "diseño por función", en el cual se basa este capítulo.

5.2.1 Función principal de separación

Se define como la separación de dos capas de suelo de diferentes propiedades físicas (granulometría, consistencia, densidad, etcétera). Existen dos aspectos que deben considerarse al colocar un geotextil, primero se pretende evitar en forma permanente la mezcla del material evitando pérdidas entre las capas de suelo y segundo, prevenir la contaminación de alguna de las capas de suelo involucradas debido a intrusión de material de alguna de ellas hacia la otra; por lo que el factor principal del geotextil es su capacidad de retención y su habilidad para sobrevivir durante la vida útil del sistema.

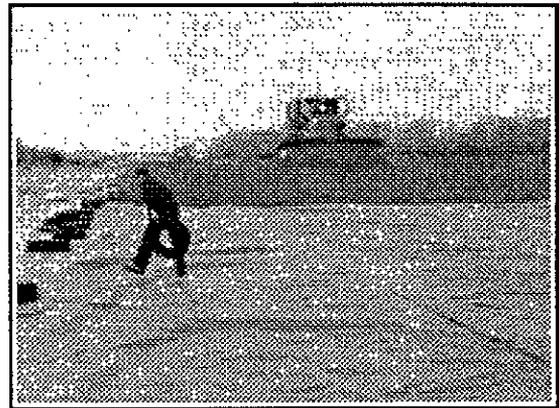


Figura 5.6 Separación de material

Tabla 5.5 Parámetros de influencia para la función de separación

Condiciones de aplicación	Mecánicos	Hidráulicos	Comportamiento a largo plazo
Colocación	Resistencia a la perforación Elongación a la rotura	Tamaño de abertura efectiva del geotextil O_e Masa por unidad de área Espesor T_g del geotextil	Estabilidad UV
Construcción	Resistencia al punzonamiento Resistencia al estallamiento (Mullen Burst) Elongación a la rotura	AOS Masa por unidad de área T_g	Estabilidad química Estabilidad UV
Vida útil de la obra	Resistencia al punzonamiento Resistencia al estallamiento (Mullen Burst) Resistencia a la rotura Resistencia al esfuerzo de propagación	AOS Masa por unidad de área T_g Retención de finos en caso de sollicitaciones estáticas o dinámicas del filtro.	Estabilidad química Estabilidad bacteriológica Resistencia al deterioro y putrefacción

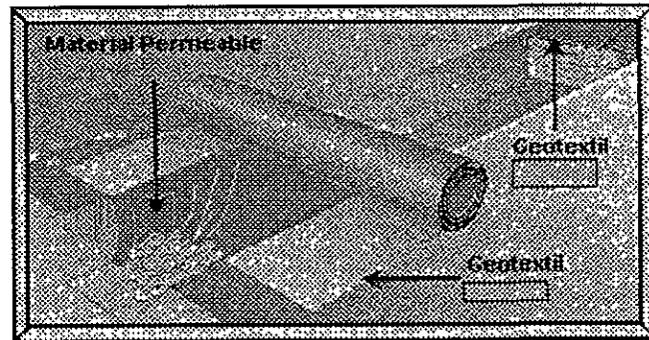
Tabla 5.4 Funciones principales del geotextil dependiendo de su aplicación.

Campos de aplicación	Funciones del geotextil					
	Separar	Filtrar	Drenar	Reforzar	Proteger	Impermeabilizar
Caminos	●	⊗	⊗	⊗		
Reasfaltado				⊗		●
Construcciones ferroviarias	●	●				
Construcciones hidráulicas	⊗	●				
Drenajes	⊗	●	⊗			
Campos deportivos	●	●				
Terraplenes	●	⊗	⊗	⊗		
Drenes verticales		●	●			
Muros de contención			⊗	●		
Túneles			●		●	
Depósitos de líquidos y desechos			⊗	⊗	●	
Capa aplicada en terracerías	⊗	●	●			
Capa aplicada en bases de caminos no pavimentados	⊗	●	●			
Capa aplicada en bases de superficies pavimentadas	⊗	●	⊗			
Aplicación en sobrecarpetas asfálticas			⊗			●
Capa de soporte de balasto en vías férreas	⊗	●	●			
Sistemas de drenajes	●	●	○	○		
Control de erosión	●	⊗	⊗	○	⊗	
Revestimiento de canales	●	●	⊗	○	⊗	
Protección de taludes	●	●	⊗	○	⊗	
Protección de orillas de ríos, lagos o mar	●	●	⊗	○	⊗	
Protección de geomembranas en rellenos sanitarios y lagos			⊗	⊗	●	
Protección de socavaciones en puentes	●	⊗	⊗		⊗	
Taludes y muros de contención a base de geotextil	○	○	●	○		
Encapsulados en rellenos de obras hidráulicas	●	⊗	●	○		
Filtro entre el relleno y muro de gaviones	●	⊗				

● Función principal
 ⊗ ○ Función secundaria

5.2.2 Función principal de filtración

Se define como la retención de partículas finas al fluir agua del estrato de grano fino al estrato de grano grueso. El geotextil debe garantizar la estabilidad mecánica (evitar la migración de finos cumpliendo los criterios de filtro para una eficiente abertura aparente de poro AOS) e hidráulica del filtro (proporcionar un flujo de agua sin presión hidrostática de ser posible y que cumpla con la permeabilidad k_v requerida del criterio de filtro) durante la vida útil de la obra.



Si el diseño es apropiado, los geotextiles pueden ofrecer un comportamiento comparable al de materiales granulares graduados a menor costo, ya que proveen características de filtración consistentes y se instalan fácilmente, evitando el empleo de grandes volúmenes de material granular. El funcionamiento del geotextil como filtro ha sido analizado por diversos autores, entre ellos Bell y Hicks (1980, 1982), Ranklor (1981), Christopher y Holtz (1985) y Koerner (1990^a).

Figura 5.7 Función de filtración

Tabla 5.6 Parámetros de influencia para la función de filtración

Condiciones de aplicación	Estabilidad mecánica del filtro	Estabilidad hidráulica del filtro	Comportamiento a largo plazo
Filtro permanente	<p>Espesor del geotextil</p> <p>Mínima y máxima abertura aparente de poro del geotextil AOS</p> <p>Condiciones externas de esfuerzo</p>	<p>Condiciones hidráulicas</p> <p>Permeabilidad del geotextil k_v</p>	<p>Porosidad del geotextil AOS (mínimo)</p> <p>Propiedades químicas del suelo y agua en contacto con el geotextil</p> <p>Estabilidad química</p> <p>Resistencia al deterioro y putrefacción</p> <p>Evitar el taponamiento del filtro geotextil</p>
Filtro temporal	<p>Espesor del geotextil</p> <p>AOS (mínima y máxima)</p>	<p>Permeabilidad del geotextil k_v</p>	-

5.2.3 Función principal de drenaje

Se define como la capacidad de retener el suelo mientras se permite la conducción de líquidos y gases, es decir, el flujo de fluidos del suelo sin perderlo, por lo que el geotextil debe garantizar el transporte de aquellos en su plano. El espesor debe ser suficiente para que trabaje bien mecánicamente al aumentar la tensión normal.

Para garantizar la estabilidad mecánica del filtro desde el punto de vista hidráulico, se debe impedir el lavado o transporte de partículas finas cuyo depósito en el geotextil provoquen una reducción de la permeabilidad horizontal k_h . Por otra parte, una buena estabilidad hidráulica garantiza el transporte del fluido (agua o gas) en el plano del geotextil con mínimas pérdidas de presión. Se debe prever el taponamiento del dren geotextil y la resistencia química y al deterioro a largo plazo.

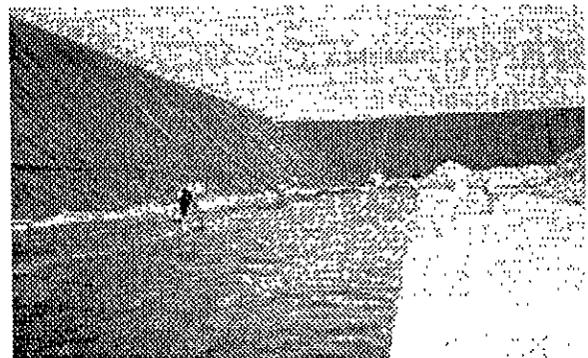


Figura 5.8 Función de drenaje

Tabla 5.7 Parámetros de influencia para la función de drenaje

Condiciones de aplicación	Estabilidad mecánica	Estabilidad hidráulica	Comportamiento a largo plazo
Drenaje permanente	Influencia de la sobrecarga de la tensión normal	Permeabilidad horizontal (en el plano), k_h Masa por unidad de área Tamaño de abertura aparente AOS	AOS Porosidad del geotextil Propiedades químicas del agua y suelo Estabilidad química Resistencia al deterioro y putrefacción
Drenaje temporal	Influencia de la sobrecarga de la tensión normal	Permeabilidad horizontal (en el plano), k_h Masa por unidad de área Tamaño de abertura aparente AOS	-

5.2.4 Función principal de refuerzo

Se define como el mejoramiento de la capacidad y calidad del suelo al incrementar su estabilidad estructural a través de la resistencia a la tensión del refuerzo, al tiempo que el comportamiento final de la obra es más eficiente. El geotextil provoca un incremento de la resistencia al corte del suelo optimizando el funcionamiento estructural del sistema suelo-geotextil. La función mecánica del geotextil es absorber tensiones por medio del efecto membrana y favorecer la distribución de los esfuerzos de tensión cuando se usan capas múltiples del mismo. Los requisitos hidráulicos del geotextil son el incremento en la estabilidad de la estructura al modificar las condiciones hidráulicas de frontera, lo que repercute en la disipación de la presión de poro y en el proceso de consolidación. Se debe tener presente que el comportamiento de tensión-deformación del geotextil en el suelo aún está en investigación y documentación, por lo que se debe actuar con cautela para evitar riesgos. Se sabe que la capacidad de carga de algunos suelos típicos puede verse afectada por varias razones, lo que origina hundimientos diferenciales y puntuales.

Estos son particularmente graves cuando afectan la impermeabilización de un relleno sanitario o de una pila de lixiviación. Así mismo, estructuras viales tales como obras de arte y estribos de puentes pueden ver afectada su calidad de servicio, además de la influencia que dichos hundimientos pueden generar estructuralmente en los caminos. Por eso es importante el conocimiento de los productos geosintéticos que alivian en muchos casos situaciones adversas de comportamiento.

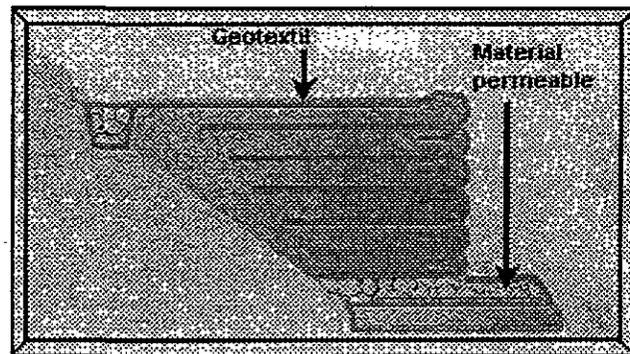


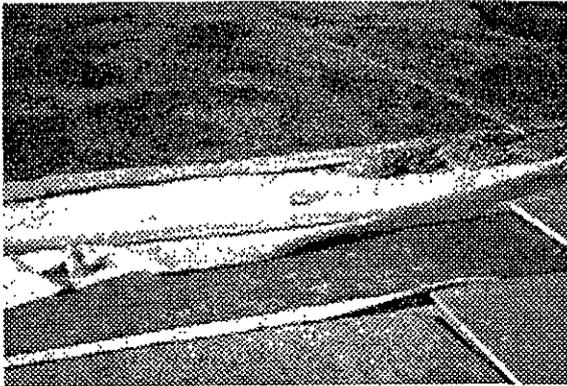
Figura 5.9 Función de refuerzo

Tabla 5.8 Parámetros de influencia para la función de refuerzo

Condiciones de aplicación	Estabilidad mecánica	Estabilidad hidráulica	Comportamiento a largo plazo
Falla del talud	Resistencia a la tensión del geotextil Fricción suelo-geotextil Resistencia confinada de elongación	Condiciones hidráulicas de frontera Permeabilidad horizontal (en el plano), k_h	Resistencia a la tensión Creep del sistema suelo-geotextil Resistencia química Resistencia al deterioro
Falla de la base del talud	Resistencia a la tensión Fricción suelo-geotextil	Condiciones hidráulicas de frontera Permeabilidad horizontal (en el plano), k_h	Resistencia química Resistencia al deterioro

5.2.5 Función principal de protección

Se define como la protección mecánica de geomembranas sintéticas contra perforación y desgaste por abrasión. La función del geotextil (generalmente de tipo grueso no tejido) es brindar protección permanente de sistemas sintéticos de impermeabilización (geomembranas) para evitar daños mecánicos durante la instalación y aún después de la construcción del sistema. El geotextil debe ser capaz de absorber los esfuerzos originados por la presión hidrostática (prueba Mullen Burst de reventamiento o estallamiento) principalmente en zonas susceptibles como las juntas o uniones, fisuras y agujeros.



Además, el efecto combinado de propiedades de resistencia y efecto amortiguador de la estructura tridimensional del geotextil proporcionan protección contra la perforación y desgaste en la superficie de la geomembrana.

A largo plazo se debe garantizar la absorción de esfuerzos adicionales, la estabilidad química y la resistencia al deterioro durante el período de operación del sistema, así como la compatibilidad con otros materiales sintéticos.

Figura 5.10 Función de protección

Tabla 5.9 Parámetros de influencia para la función de protección

Condiciones de aplicación	Estabilidad mecánica	Comportamiento a largo plazo
Construcción de rellenos y embalses con geomembrana	Resistencia al punzonamiento Resistencia a la presión BURST Coeficiente de fricción	Estabilidad química (pH = 2 – 13) Resistencia al deterioro Resistencia a la putrefacción Resistencia a la tensión Creep
Alivio de esfuerzos para retardar el agrietamiento	Masa por unidad de área	Resistencia a la tensión Creep
Construcción de cubiertas	Resistencia al punzonamiento	Compatibilidad química
Construcción de túneles	Resistencia a la presión BURST Resistencia al punzonamiento Resistencia a la abrasión	Estabilidad química (pH = 2 – 13) Resistencia al deterioro

5.2.6 Función principal de impermeabilización

Se define como la creación de una capa impermeable mediante la impregnación del geotextil, el cual debe ser apropiado como material de soporte para la impregnación con asfalto u otro material impermeabilizante sintético modificado. El geotextil debe tener la capacidad suficiente de acumular cantidades adecuadas de asfalto (bitumen), contar con una estructura homogénea que permita una contracción térmica mínima debida a la variación de temperaturas y un comportamiento apropiado ante los esfuerzos provocados por estos cambios, así como una alta afinidad con el material impermeable. Además, el geotextil tendrá una rigidez y resistencia suficientes que permitan su colocación sin maltratarlo.

Figura 5.11 Función de impermeabilización



Tabla 5.10 Parámetros de influencia para la función de impermeabilización

Condiciones de aplicación	Características físicas	Estabilidad mecánica
Repavimentación	Nivel de saturación de asfalto Encogimiento Homogeneidad del producto	Resistencia a la tensión del geotextil Resistencia a la deformación del geotextil Rigidez inherente
Membranas líquidas	Capacidad de saturación Encogimiento Homogeneidad del producto	Resistencia a la tensión del geotextil Rigidez inherente Flexibilidad
Membranas encapsuladas (Método de capas de suelo)	Capacidad de saturación Homogeneidad del producto	Resistencia a la presión BURST Resistencia al punzonamiento Elongación a la falla

5.3 Uso y aplicación de los geosintéticos (geotextiles y geomembranas)

5.3.1 Procedimiento general de aplicación de un geotextil

A continuación se presentan algunos lineamientos generales para la instalación de geotextiles, los cuales deben incluirse en las especificaciones de construcción de la obra en cuestión.

Procurar que la superficie donde se colocará el geotextil esté lo más lisa y estable posible, libre de baches, ramas, piedras y objetos que puedan dañar al geotextil.

Los rollos del material pueden desenrollarse a mano o utilizando algún equipo adaptado para ello, con lo cual se puede aumentar la productividad. Se debe evitar en lo posible las arrugas o pliegues al colocarlo y procurar no pisar el material al estar siendo colocado. Cuando el material esté sujeto a un arrastre significativo del agua o el viento o en una pendiente pronunciada, será necesario fijarlo usando montones de tierra, piedras sin aristas agudas o fijarlos con anclas, broches o estacas enterrados en el suelo.

La unión o traslape entre geotextiles debe ser de un mínimo de 30 cm. Para el caso de función de refuerzo en suelos blandos o refuerzo de suelos en taludes, se deben utilizar traslapes mayores de la longitud necesaria que asegure una adecuada transferencia de tensión, también pueden utilizarse traslapes cosidos o engrapados de aproximadamente 10 cm de acuerdo a lo indicado en las especificaciones constructivas.

Es recomendable no tener el producto expuesto al sol por más de 15 días, a menos que esté debidamente diseñado para resistirlo. Se debe mantener en la sombra al ser almacenado y procurar recubrirlo con el material de relleno de la base cuando se esté instalando. Si la aplicación requiere que el material sufra una exposición prolongada al sol, entonces será necesario tratarlo debidamente para soportar los rayos UV. Igualmente, es indispensable que se mantenga en su bolsa mientras no se use, para evitar que absorba agua y lo haga muy pesado y difícil de manejar.



Figura 5.12 Aplicación de geotextil en vías férreas

Para el caso de superficies blandas, como suelos con VRS menor de 10, el material de recubrimiento que se aplique por encima del geotextil debe ser colocado por delante, de tal manera que el equipo que esparce y maneja el material de relleno no pise directamente sobre el geotextil, para lo cual deberá existir un espesor mínimo de 20 ó 30 cm de relleno. Así, se protege el geotextil de los equipos de nivelación y compactación, además de que proporciona confinamiento para que el geotextil desarrolle la función de refuerzo para controlar deformaciones, aparte de la separación de suelos. El material de relleno debe tener una granulometría adecuada y las gravas deberán tener las aristas redondeadas, pues las angulosas pueden dañar el geotextil.

En aplicaciones de sobrecarpetas asfálticas o en suelos firmes libres de piedras angulosas que puedan perforar el geotextil, los equipos de construcción pueden pisar el producto con la debida precaución, evitando arranques o frenados bruscos mientras se coloca el material de relleno o sobrecarpeta para después permitir el tráfico vehicular.

5.3.2 Aplicación de geotextiles para sobrecarpetas asfálticas

Es común pensar que los pavimentos son impermeables. En realidad, el agua superficial se infiltra a través del pavimento, ya sea de concreto asfáltico o de concreto Portland. El agua de lluvia, de drenajes superficiales o de irrigación, choca con el pavimento, se infiltra a través de éste y se asienta en la base de la carretera. Debido a que la mayoría de las bases de las carreteras no cuentan con un drenaje apropiado, el agua permanece en la base y en la subrasante causando el deterioro prematuro del pavimento. El suelo de la subrasante penetra la base del agregado de la carretera, arruinando las bases tratadas con asfalto y rompiendo las bases estabilizadas químicamente. Una estructura de pavimento saturada el 10% del tiempo de servicio, sólo alcanzará un 50% de su vida de diseño.

Actualmente, es común el uso de geotextiles en pavimentos nuevos, con el fin de proporcionar drenaje y separar el subsuelo de la base limpia. Para pavimentos con bases de drenaje libre, el geotextil debe unirse a un drenaje efectivo al borde del pavimento o a un sistema de drenaje inferior que ayude a drenar el agua rápidamente. La solución más simple es impedir el paso del agua hacia el cuerpo de la carretera, es por eso que se usan sistemas de entrecapa con geotextil. Cuando se instala correctamente, el sistema de entrecapa mantiene la humedad fuera y provee una capa de absorción de esfuerzo que retarda las grietas reflexivas e incrementa (extiende) la fatiga en los pavimentos.

El agrietamiento del pavimento es señal de peligro visible en el mismo. Los agrietamientos comunes se dan de tipo reflexivo y por fatiga (provocado por flexión del pavimento sometándolo a tensión), comienzan en la base de las capas del pavimento y emigran hacia la superficie. La mecánica de vigas muestra que mientras más gruesa sea una viga, mayor será la capacidad de soportar esfuerzo a tensión en la base para una cantidad específica de flexión. Un contacto fuerte de la carpeta asfáltica nueva con solo un mínimo de riego de liga asfáltico tiende a vincular la carpeta a las capas inferiores del pavimento, formando una capa más gruesa. El agrietamiento por fatiga y reflexivo puede retardarse y controlarse utilizando el sistema de entrecapa con geotextil especial para pavimentación; un tercer tipo de agrietamiento en pavimentos es el originado por calor, que provoca expansiones y contracciones.

Se limpiará el pavimento dañado de polvo, suciedad, vegetación y humedad. Las grietas mayores a 6.3 mm deberán limpiarse y rellenarse adecuadamente antes de colocar el geotextil. Los baches deberán ser recompactados en la base, rellenos y tratados con un riego de liga.

La cantidad de riego de liga requerido depende de la porosidad relativa del pavimento dañado, la temperatura ambiente y el tipo de riego de liga; éste requerirá esparcirse 15 cm adicionales al ancho del rollo del producto.

Si se usan emulsiones asfálticas, el riego de liga necesitará romper antes de instalarse el geotextil. Una vez colocado el producto, las presiones a que se sujete deberán ser ligeras.

Las arrugas mayores de 12.7 mm requerirán ser cuidadosamente cortadas con navaja y traslapadas en la dirección del pavimento, aplicando un riego de liga adicional entre capas. Todas las juntas deberán ser traslapadas como mínimo 75 mm longitudinalmente y 150 mm transversalmente. Si el geotextil se humedece durante la instalación, será necesario permitir su secado por completo antes de colocar la carpeta asfáltica, ya que los geotextiles húmedos no pueden ser abiertos al tráfico. Una vez controlado lo anterior, se continuará con las operaciones tradicionales de pavimentación.

Después de que el geotextil ha sido colocado apropiadamente sobre el riego de liga, la superficie deberá ser cubierta con un poreo (que puede ser la misma mezcla asfáltica para la carpeta), con la intención de que el geotextil no se adhiera a las llantas del equipo de construcción. La cantidad dependerá del tipo y granulometría de la base. El poreo se esparcirá uniformemente evitando que el equipo circule directamente sobre el tejido. Finalmente la superficie será cubierta con la nueva carpeta asfáltica y compactada de acuerdo con los métodos tradicionales.

5.3.2.1 Aplicación de geotextil para refuerzos de sello

La preparación del lugar incluye la remoción de suelo y grava suelta del pavimento. Después se aplicará un riego de liga uniformemente sobre la superficie existente. La emulsión asfáltica deberá tener una dosificación suficiente para asegurar la saturación completa del geotextil para lograr la impermeabilización del camino y esperar a que éste "rompa" antes de la colocación del geotextil. Sobre el riego de liga se instalará el geotextil, se aplicará otro riego de liga y se pondrá la piedra de sello. Finalmente, la superficie deberá compactarse con un rodillo liso seguido de un compactador neumático. Una vez terminado el riego de sello se podrá permitir el tránsito de vehículos para que proporcionen compactación adicional.

Evaluaciones en campo a largo plazo, han mostrado que el uso apropiado de geotextiles tejidos en sobrecarpetas de pavimentos de asfalto, incrementan la vida útil arriba del 50%. Estudios de pavimentos con geotextil han determinado que el rendimiento equivale a 30 mm de espesor de concreto asfáltico.

Se sabe que la mayoría de las fallas de subrasante ocurren por la entrada de agua en la base del pavimento, lo que debilita la resistencia del suelo base. El geotextil absorbe el riego de liga en la superficie del pavimento para crear una barrera permanente contra la humedad. Este sistema previene filtraciones del agua a través de grietas, juntas y la porosidad propia del pavimento incrementando el drenaje en la superficie y desviando la trayectoria del agua. Así, la subrasante mantiene un contenido menor de humedad y un máximo en la capacidad de carga. Sin el geotextil podrían formarse prematuramente en la sobrecarpeta excesivas deflexiones, grietas y baches, por lo que su uso favorece el retardo del agrietamiento. Situando el geotextil en la superficie agrietada se incrementa de forma considerable la ductilidad y resistencia al corte del pavimento flexible. La energía normalmente transferida de las grietas en el pavimento a reparar dentro de la sobrecarpeta es absorbida por la estructura del geotextil; además la capacidad de soporte a la fatiga y la resistencia a la tensión en la superficie también se incrementa.

5.3.3 Procedimiento general de instalación de una geomembrana

La geomembrana debe ser recibida y almacenada en lugar seguro y adecuado para que no sufra de daños de punzonamiento, abrasión o desgarre.

El contratista de la terracería debe de preparar la superficie en donde se colocará la geomembrana. La superficie debe estar bien compacta y lisa, libre de baches, ramas, piedras de más de 1.25 cm, objetos que puedan dañar o perforar la geomembrana. Si esto no es posible o si se desea reducir los requerimientos mecánicos sobre la geomembrana, se puede contemplar la colocación de un geotextil por debajo de la geomembrana como protección de ésta contra abrasión y objetos punzantes.

La geomembrana debe colocarse en situación relajada, sin tensionarla, no deben existir arrugas grandes. Para fijar el material temporalmente para evitar movimientos debidos al aire o agua, se pueden usar montones de tierra, sacos de arena o piedras redondas.

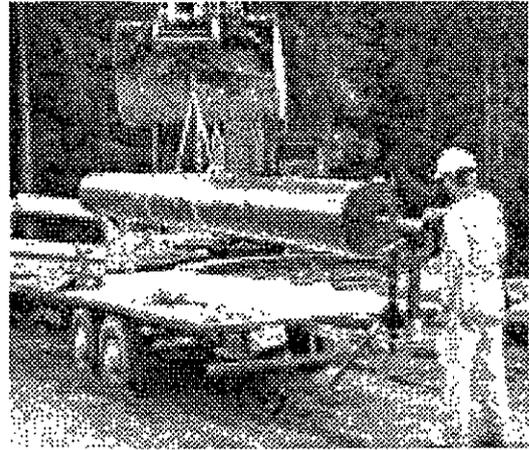
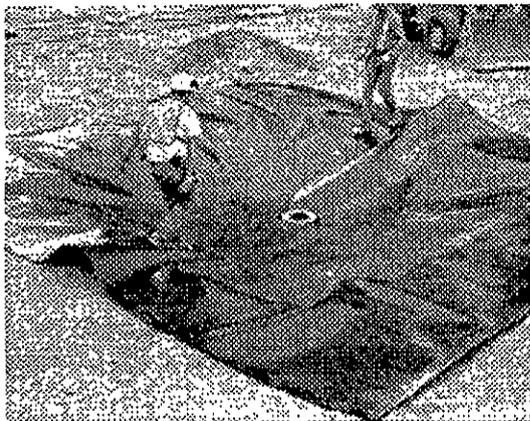


Figura 5.13 Manejo de los rollos

No se debe pisar la geomembrana directamente con equipo de construcción, a menos que sea ligero y con las debidas precauciones, sólo a pie y con zapatos que no la dañen. En zonas donde haya penetraciones de tuberías o descargas, debe sellarse herméticamente la unión. Las zonas dañadas deben parcharse con un traslape mínimo de 15 cm extendiendo más allá del perímetro de la abertura.

La geomembrana puede unirse por medio de equipo de termofusión o por unión química de solventes especiales o adhesivos. En caso del proceso de termofusión con doble banda de soldadura y canal intermedio de prueba, se puede probar la hermeticidad de la junta aplicando presión de aire en el canal y corroborando que no haya fugas (véase punto 4.6).

La trinchera de anclaje será responsabilidad del contratista de terracerías y debe tener un mínimo de 30 cm de ancho por 30 cm de profundidad y alejada un mínimo de 50 cm de la cresta del talud. Asegurarse de que los taludes tengan la estabilidad adecuada (en muchos casos no es recomendable que excedan de 35° de inclinación).



En algunos casos, se aconseja hacer sistemas de drenaje, trinchera o tubo perforado de ventilación por debajo de la geomembrana, para aliviar presiones hidrostáticas o de gas que se pudieran generar por causas de fugas de agua, presencia de nivel freático elevado, infiltraciones laterales o gases producidos por descomposición de materia orgánica. Se recomienda aplicar un esterilizador al suelo (herbicida) que no dañe la geomembrana, para evitar que con el tiempo crezca la vegetación por debajo de la misma.

Figura 5.14 Sistema de drenaje

En ocasiones, se coloca relleno por encima de la geomembrana para protegerla del equipo que la pisa, de rayos UV o de vandalismo. El material de relleno debe ser adecuado y libre de rocas, palos, objetos punzantes; debe colocarse por delante, de tal manera que el equipo que maneja y esparce el material de relleno no pise directamente sobre la geomembrana. Deberá existir un espesor mínimo de 30 cm de relleno para proteger el material de los equipos de nivelación y compactación.

Finalmente, en recipientes para contener elementos muy agresivos (industria química o alimentaria, depuración de aguas residuales en zonas de recarga de acuíferos, vertederos o rellenos sanitarios,...), se puede disponer una doble geomembrana. En este caso y siempre que existan dos capas impermeables, entre las dos geomembranas se debe colocar un material drenante para evacuar eventuales filtraciones.

5.3.4 Aplicación de geosintéticos en un relleno sanitario

La disposición final corresponde a la última etapa del proceso del manejo de los residuos sólidos, la cual contempla el depósito de los mismos en un lugar específico y seguro, a efecto de concentrarlos o aislarlos para su posterior degradación.

Tradicionalmente en nuestro país, la disposición final de los residuos sólidos municipales se ha venido realizando de manera incontrolada, mediante la práctica del denominado "tiradero a cielo abierto", el cual consiste básicamente en el depósito no controlado de los residuos sólidos en el suelo, generando problemas ambientales y de salud pública. Es importante considerar que los materiales depositados tienen un tiempo de degradación y descomposición muy variable, lo que da lugar a la formación de nuevos componentes químicos (lixiviados y biogás) que provocan la contaminación del medio, haciendo que el suelo pierda muchas de sus propiedades originales y se vuelva tóxico. Los problemas más comunes se describen a continuación:

Salud: Proliferación de fauna nociva (insectos, roedores, etcétera)
Representan un foco de propagación de enfermedades

Sociales: Existencia de la segregación de los residuos sólidos (pepena)
Marginación de los sectores que se dedican a la separación de subproductos

Económicos: Disminución en el valor económico de los terrenos ocupados y aledaños al tiradero

Ecológicos y Ambientales:

Contaminación del suelo, aire y agua subterránea

Malos olores

Contaminación de cuerpos de agua por la generación y migración de lixiviados

Riesgos potenciales de explosión e incendio por la generación y migración de biogás

Deterioro ecológico

Estéticos: Alteración del paisaje circundante por incendios, polvo y residuos dispersos
Degradación de la estética del lugar

De manera conceptual en la figura 5.15 se pueden identificar las principales vías de afectación al entorno y a la salud pública.

El relleno sanitario es un método de disposición final controlado que utiliza principios de ingeniería para el depósito, esparcido y compactación de los residuos sólidos municipales, ocupando para ello el menor espacio posible y cubriéndolos con una capa de tierra al término de cada jornada, de tal modo que se minimicen los impactos negativos al ambiente, así como los riesgos a la salud y la seguridad de la población. Cabe señalar, que el uso de geosintéticos en la construcción de rellenos sanitarios se ha generalizado en la actualidad, debido principalmente a la poca disponibilidad de sitios aptos para tal fin que cuenten con las especificaciones que establecen las instituciones gubernamentales encargadas de la legislación y normatividad ecológica.

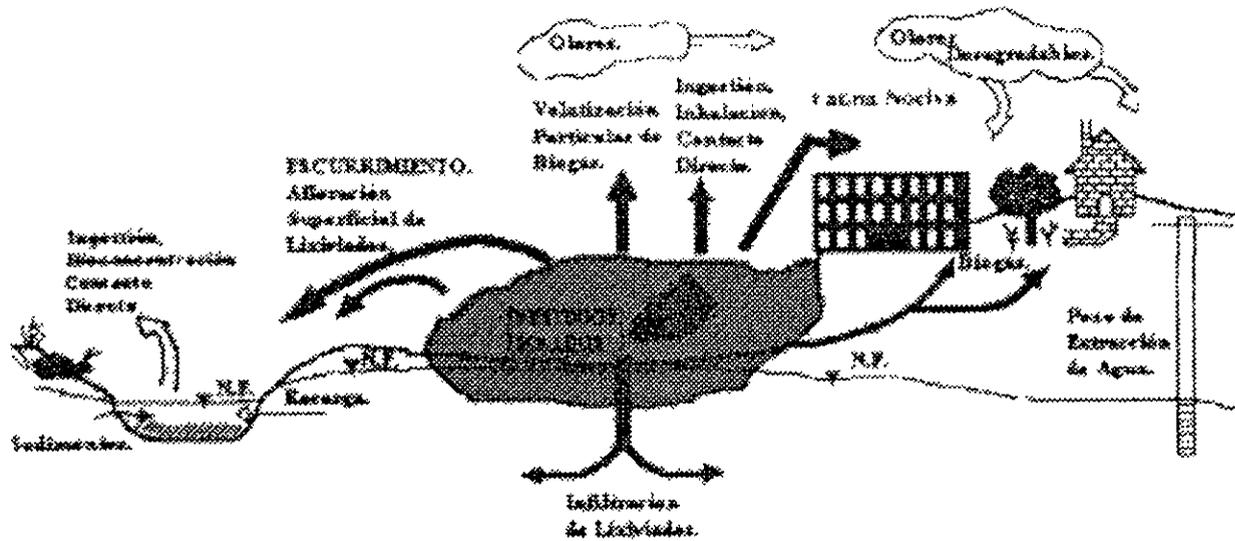


Figura 5.15 Afectación al entorno

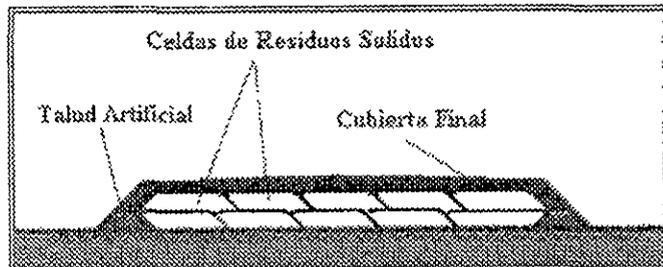
Los geosintéticos tales como geotextiles y geomembranas son los de mayor uso en el diseño y construcción de rellenos sanitarios, con el objetivo de estabilizar e impermeabilizar los suelos, para evitar la contaminación del subsuelo y acuíferos subterráneos provocada por los lixiviados.

Existen diferentes métodos de operación para los rellenos sanitarios:

Área: Este método se emplea en aquellas zonas donde no es posible o no se desea excavar zanjas o trincheras. Los residuos se depositan en franjas de ancho igual al frente de trabajo sobre la superficie preparada (impermeabilizada) en series de capas, se compactan y se cubren con una capa de suelo compactado al término de las operaciones del día. El material de cubierta puede tomarse del sitio de relleno o traerse de otro lugar.

Rara vez es restringido por la topografía; es aplicable en terrenos planos o sinuosos, cañones y otro tipo de depresiones. Para poder iniciar la operación, generalmente se requiere de la construcción de un terraplén que sirva de apoyo para la colocación de la primera capa de residuos y contra el cual se puedan compactar.

Figura 5.16 Método de área



Trinchera: Este método es utilizado en terrenos con pendiente muy suave donde se cuenta con material de cubierta y el nivel de aguas freáticas es profundo. Se excavan celdas o trincheras en el suelo, mismas que son impermeabilizadas con geomembranas sintéticas o arcillas de baja permeabilidad para limitar el movimiento de gases y lixiviados.

Los residuos son depositados, esparcidos, compactados y cubiertos con el material producto de la excavación al final de la jornada. Pueden excavar varias trincheras y almacenar el material de cubierta o bien obtener el material diariamente. La profundidad de las trincheras depende del nivel de aguas freáticas y de las características del suelo. El ancho de las trincheras debe ser de al menos dos veces el ancho de la maquinaria para que pueda compactarse el material en el área de trabajo.

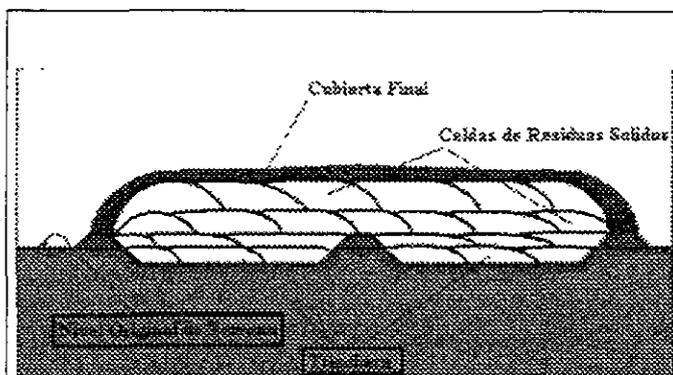


Figura 5.17 Método de trinchera

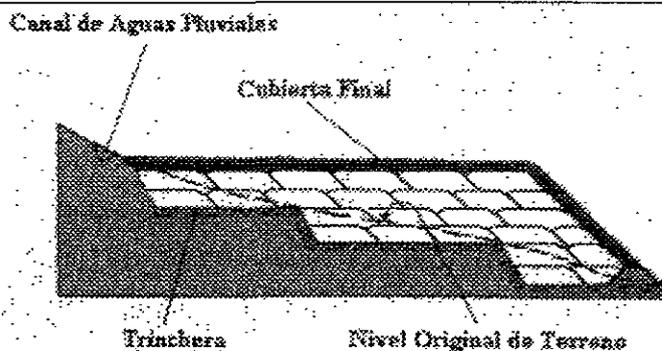


Figura 5.18 Método combinado

Combinado: Cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y físicas del sitio son apropiadas se pueden combinar los dos métodos anteriores. Se inicia con el método de trinchera y posteriormente se continúa con el método de área en la parte superior; otra variante consiste en iniciar con un método de área, excavando el material de cubierta de la base para formar una trinchera, la cual servirá también para ser rellenada.

Las profundidades recomendadas para la cubierta de tierra depende de los periodos de exposición y se muestran a continuación:

Tabla 5.11 Profundidades recomendadas

Tipo de cubierta	Profundidad mínima (m)	Tiempo de exposición (días)
Diaría	0.15	menor a 7
Intermedia	0.30	de 7 a 365
Final	0.60	mayor a 365

Al cubrir los residuos se favorece el control de malos olores. La quema de basura contribuye a la contaminación atmosférica por lo que no se permite en el relleno sanitario. Los desechos sólidos vertidos en un relleno sanitario pueden experimentar muchos cambios biológicos, químicos y físicos. Los desechos en descomposición por sí mismos elevan su temperatura entre los 40° y 60°C. La descomposición aerobia y anaerobia de la materia orgánica genera productos finales gaseosos y líquidos. Algunos materiales se oxidan químicamente. Algunos sólidos se disuelven en el agua que se percola a través del relleno.

Los productos gaseosos principales resultantes de la descomposición bacteriana de los desechos son metano, nitrógeno, bióxido de carbono, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. Los estudios demuestran que durante los primeros años de la vida de un relleno el gas predominante es bióxido de carbono, mientras que en los últimos años el gas está compuesto casi en igual proporción de bióxido de carbono y metano. Debido a que el metano es explosivo, debe controlarse su movimiento para evitar posibles incendios. Algunos rellenos se han ventilado con chimeneas que colectan el metano para uso local y comercial como fuente de energía.

Los lixiviados son el producto líquido de la basura en descomposición, que aunado al agua de lluvia se infiltran a través de las capas de basura, de este modo se acumulan grandes cantidades de contaminantes líquidos concentrados muy dañinos que contienen materia suspendida y disuelta. Con el fin de prevenir la contaminación del agua subterránea se requieren estrictas medidas para el control de los lixiviados en el relleno, por lo que las acciones para una apropiada captación de éstos son (de arriba hacia abajo del relleno):

1. Tubería de drenaje
2. Membrana plástica
3. Segunda capa de tuberías de drenaje (en caso de que la primer membrana se rompa)
4. Segunda membrana plástica
5. Arcilla impermeable

Las tuberías de drenaje se instalan con tubos perforados diseñados para colectar el lixiviado que se infiltra en el relleno y conducirlo a un sistema central de tratamiento. La apropiada planeación, selección del sitio y operación pueden minimizar la posibilidad de contaminación del agua superficial y subterránea.

Por otro lado, se sabe que la ingeniería geotécnica prevé el uso de materiales granulares (arenas y gravas) oportunamente seleccionados y colocados en capas de espesor suficiente para soportar cargas y garantizar la transmisividad (flujo en el plano) requerida; en el caso de rellenos sanitarios, el espesor del material drenante necesario crece al incrementarse la presión ejercida por los residuos, por lo tanto, más allá del costo del volumen del material utilizado, crece también el costo del volumen de relleno no utilizado y el gasto e impacto ambiental consiguiente al aprovisionamiento.

Las georredes representan una posible alternativa con respecto al material granular, especialmente frente a grandes distancias de transporte y sobre todo por su rapidez de instalación, aún en planos inclinados. Su estructura bidimensional de espesor limitado y su gran resistencia a cargas normales al plano, permiten el fácil flujo de los líquidos (lixiviados). Gracias a su capacidad drenante y notable resistencia a la compresión, el uso de georredes va en aumento para reemplazar los materiales convencionales de drenaje (arena y grava). El costo final de la obra puede resultar más económico, con la ventaja adicional de la facilidad de construcción y la homogeneidad de sus propiedades.

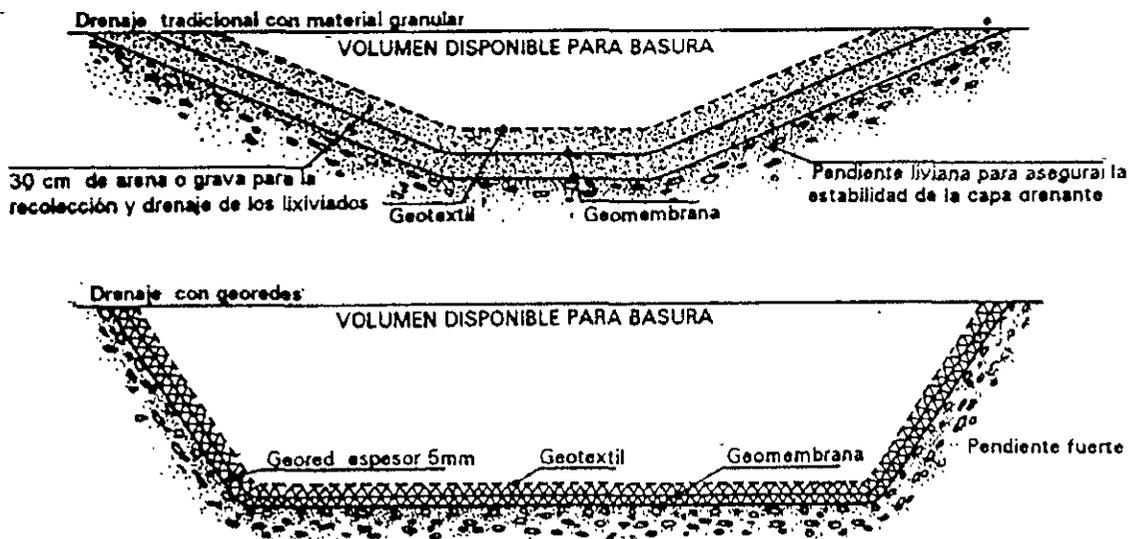
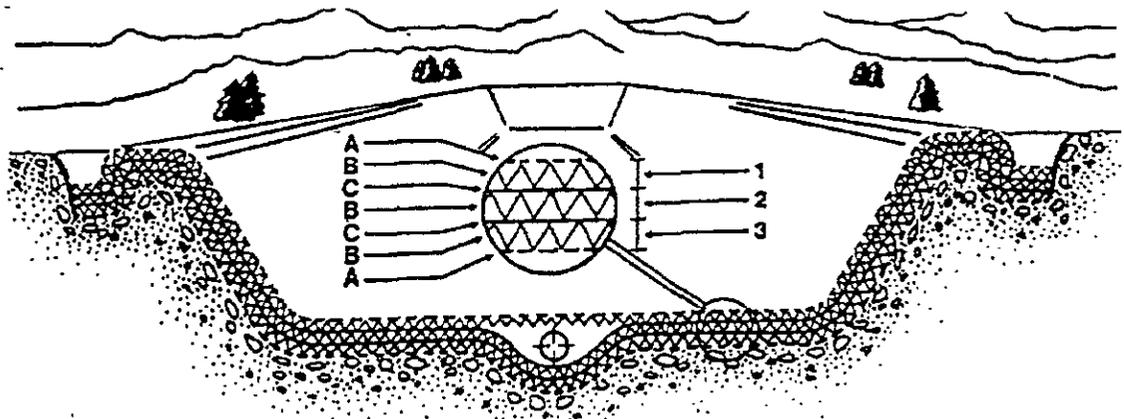


Figura 5.19 Georredes, alternativa al drenaje tradicional

Los factores geotécnicos a considerar para su elección dependen del tipo de finalidad del drenaje.

Caso 1. Minimizar las pérdidas, el elemento drenante es interpuesto entre la masa contaminante y el elemento de impermeabilización. Su función principal es la recolección de los lixiviados, necesaria en el caso de los rellenos sanitarios, pero el efecto práctico sobre el ambiente es la minimización del riesgo de contaminación por reducirse la carga hidráulica sobre el orificio potencial y por consecuencia, las cantidades de lixiviados eventualmente perdidos a través de las fallas de impermeabilización.

Un buen sistema drenante es el capaz de evacuar todas las aguas confluyentes en el relleno (principalmente las de lluvia), por lo que es primordial un balance hidrológico para la determinación de la transmisividad requerida. En este caso, la georred protege a la geomembrana de las asperezas de la masa contaminante y está también sujeta al riesgo de reducción de transmisividad por oclusión de sus elementos de canalización. Esta situación puede prevenirse con la instalación de un elemento filtrante cuyo estudio no es sencillo. Primero, porque la granulometría de los residuos no es constante, segundo porque la oclusión biológica de los filtros que aparece más rápida que la oclusión mecánica, no ha sido suficientemente estudiada. Por esta razón, la tendencia reciente es de almacenar, en la proximidad de las paredes del relleno, desechos procedentes de demoliciones y además, en el caso de espesores de desechos significativos es recomendable colocar capas drenantes intermedias de georredes.



A - GEOTEXTIL espesor 0,5 mm
 B - GEORED espesor 4 + 7 mm
 C - GEOMEMBRANA espesor 0,5 + 2,5 mm

1 - Recolección y drenaje lixiviados
 2 - Control y drenaje pérdidas accidentales
 3 - Redistribución cargas, protección mecánica geomembrana, drenaje napa y aguas subterráneas

Figura 5.20 Esquema de drenajes con georredes en rellenos sanitarios

Caso 2. Control de las pérdidas, el elemento drenante es interpuesto entre el elemento impermeabilizante y el suelo que no se quiere contaminar. Si los materiales en contacto con el elemento drenante contienen partículas de suelos finos y de toda forma de tamaño inferior a la dimensión de las aberturas de las mallas, pueden presentarse fenómenos de oclusión de la georred. Esta situación puede prevenirse disponiendo filtros naturales o instalando elementos filtrantes sintéticos del tipo geotextiles.

En el caso de contaminantes de extrema peligrosidad se tiende a colocar una segunda capa de impermeabilización. En este caso, la georred es colocada entre las dos capas impermeables y la transmisividad requerida es función de las pérdidas aceptables.

En el caso de impermeabilización simple (una capa) al caudal de pérdida aceptable hay que agregarle la filtración de aguas subterráneas, tomando en cuenta que gracias a la tendencia natural a la oclusión de todos los filtros, el elemento filtrante (ej. geotextil) se va a convertir con el tiempo en un elemento de impermeabilización secundaria.

El caudal de pérdida aceptable es el elemento principal de diseño, porque permite la definición de la transmisividad requerida, se debe considerar siempre el gradiente hidráulico y las sobrecargas para cumplir con las normas de ensayo de transmisividad (ASTM D-4716).

En el uso de geoproductos para fines de contención de desechos sólidos es necesario establecer de forma clara las solicitaciones a que es sometido cada elemento del sistema como geomembrana, geotextil, georred, geomalla, geotubo, entre otros; a fin de establecer el factor de seguridad para la función primaria que realiza cada material. Para cumplir con las especificaciones de la EPA (*Environmental Protection Agency*) de los Estados Unidos, se han desarrollado métodos de diseño que establecen diversos factores de seguridad para las solicitaciones a considerar y que reflejan la intensidad con que éstas afectan a los geosintéticos. En la siguiente tabla se señalan los factores de seguridad típicos empleados para cada acción (Koerner 1990).

Tabla 5.11 Factores de seguridad típicos (Koerner, 1990)

Acción	Factor de Seguridad (FS)
Geomembranas	
Peso propio	10 a 100
Peso de relleno (tensión)	0.5 a 10
Impacto durante la construcción	0.1 a 5
Peso del relleno (compresión)	10 a 50
Perforación	0.5 a 10
Asentamiento del relleno	10 a 100
Asentamiento bajo el relleno	0.3 a 10
Geotextiles	
Filtración de lixiviados	10 a 100
Retención de lixiviados	0.5 a 100
Colmatación por lixiviados	0.2 a 10
Separación de georredes	1.0 a 5
Separación de geocompuestos	10 a 100
Protección de geomembranas	desconocido
Georredes y geocompuestos	
Resistencia del núcleo	2 a 10
Flujo en el núcleo	3 a 100
Creep del núcleo	2 a 10
Intrusión elástica de geomembranas	1 a 5
Intrusión elástica de geotextiles	1 a 5
Intrusión por Creep de geomembranas	desconocido
Intrusión por Creep de geotextiles	desconocido
Polímeros	
Poliamida o nylon (PA)	2 a 3
Polietileno (PE)	2.5 a 5
Polietileno orientado	2.5 a 4
Poliéster (PET)	2 a 2.5
Polipropileno (PP)	2.5 a 5
Polipropileno orientado	2.5 a 4

A continuación se describen los criterios para selección de sitios de relleno sanitario (SEDESOL 1995)

- Considerar la hidrología y el clima del lugar
- Considerar la planeación municipal de uso de suelo
- La profundidad del manto freático deberá localizarse a una profundidad vertical mayor de 10 m del nivel freático.

- La zona de fracturación o falla geológica (en su caso) deberá ubicarse a una distancia horizontal de 100 m como mínimo.
- Deberá realizarse un estudio geofísico de los estratos del suelo a una profundidad de 120 m, con el fin de evitar suelos porosos.
- El suelo deberá permitir la remoción de contaminantes con un coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-5} cm/s y tener capacidad de intercambio catiónico de 30 meq/100 g de suelo.
- Deberá contar como mínimo con un 25% del material de cubierta en relación al volumen de residuos a disponer diariamente.
- Tener una vida útil de 7 años como mínimo.
- El relleno deberá ubicarse a una distancia mayor de 1 km de las zonas de inundación, cuerpos de agua y corrientes naturales.
- Estará ubicado a una distancia mayor de 500 m con respecto al área urbana, a 70 m de las vías de comunicación terrestre, a una distancia mayor de 1 km de áreas naturales protegidas, respetar el derecho de vía de 20 m y a una distancia mayor de 150 m de áreas de almacenamiento de hidrocarburos.
- Deberá permitir la salida de aguas de lluvia naturalmente.
- La pendiente media en la base del terreno natural no será mayor del 30%.
- Se utilizará una cubierta de tierra impermeable y se proporcionará un drenaje adecuado.

Los principales elementos que deben considerarse en la planeación, diseño y operación de un relleno sanitario son (véase figura 5.22):

- Sistema de impermeabilización (arcillas y/o productos sintéticos)
- Sistema de colección de lixiviados
- Tratamiento de lixiviados
- Control y recuperación de biogás
- Implementación de técnicas para la clausura final del sitio
- Control de entrada de residuos al sitio de disposición
- Sistemas de monitoreo ambiental

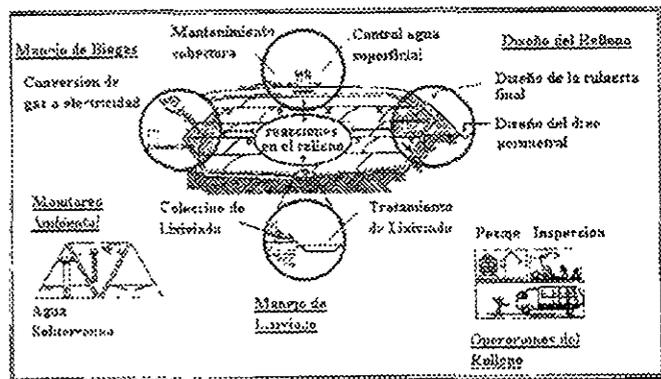


Figura 5.22 Consideraciones de diseño y operación

El proceso constructivo general de un relleno sanitario con geosintéticos se define a grosso modo así: una vez construida la celda que almacenará los residuos sólidos, se procede a realizar la impermeabilización de la parte inferior colocando primero un geotextil que proteja a la geomembrana que le sigue de posibles punzonamientos provocados por el material punzocortante al asentarse la basura, después se colocará otra capa geotextil que favorecerá la evacuación de los gases que se forman en el interior del relleno. Una vez que se llenó la celda con los desechos, el depósito se cubre con un sistema de impermeabilización superficial que se logra con la colocación de una geomembrana sobre un geotextil, para evitar la infiltración de precipitaciones y la posterior migración de sustancias tóxicas al agua subterránea. Sobre la geomembrana se colocará un geotextil que protegerá a la geomembrana contra daños que pueda ocasionar la colocación de material y tránsito de vehículos de la obra.

La técnica del *sandwich* (geotextil-geomembrana-geotextil) presenta las siguientes ventajas: permite coleccionar el biogás y/o evitar que se acumule en el interior del relleno sanitario, protege a la geomembrana contra punzonamientos, garantiza una superficie de trabajo plana, limpia y continua y cubre irregularidades en el subsuelo.

La mayoría de las fallas de un sistema de impermeabilización se deben a las fallas por tensión debidas a los asentamientos producidos por la degradación de la propia basura y los ataques químicos. Las condiciones climáticas, el polvo, personal no calificado y equipo deficiente son parámetros que influyen de manera importante.

Ventajas de un relleno sanitario

- ✓ El relleno sanitario como método de disposición final de residuos sólidos municipales es la alternativa más económica.
- ✓ La inversión inicial de capital es inferior a la que se necesita para la implementación de un sistema de tratamiento tal como la separación, composteo o incineración.
- ✓ Cuando se dispone de material para la cubierta de los residuos en el mismo sitio, esta opción es la más económica de las diferentes que existen para la disposición final.
- ✓ El relleno sanitario es un método final para la disposición de los residuos que no requiere de operaciones adicionales, como en el caso de la incineración o el composteo, los cuales requieren un sitio y de operaciones adicionales para la disposición de los productos finales.
- ✓ Se recuperan terrenos antes considerados como improductivos o marginales, transformándolos en áreas útiles para la creación de parques, zonas recreativas y esparcimiento o áreas verdes.
- ✓ Es un método flexible, dado que en caso de incrementar la cantidad de residuos por disponer se requiere únicamente de muy poco equipo y personal.
- ✓ El gas metano generado por la descomposición de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos, puede ser atractivo para su aprovechamiento como fuente de energía no convencional, dependiendo de las características del sitio.

5.3.5 Evaluación de geomembranas para revestir un canal

Para su uso en vasos y canales, se analizaron aspectos como diseño, actividades previas a la instalación, procedimientos de unión y de verificación de la calidad, métodos de reparación, costo y su comportamiento en condiciones de servicio.

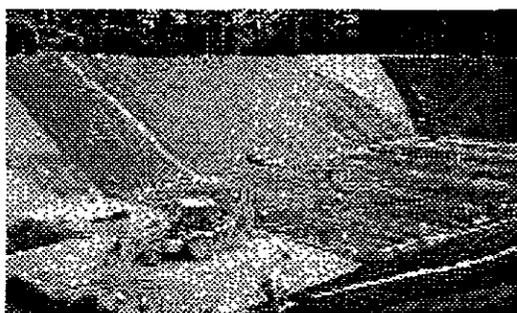


Figura 5.23 Revestimiento de un canal

En general se requiere de una rígida supervisión que verifique las propiedades de la geomembrana tanto en obra como en laboratorio, mereciendo atención especial la supervisión de las uniones, ya que como se ha dicho, éstas deben garantizar un sello continuo y permanente que evite las fugas, además de que deben resistir los esfuerzos y deformaciones de instalación y servicio del revestimiento (Rollin, Fayoux, 1991).

En 1993, se consideró revestir con geomembrana un canal de 4 000 m de longitud con capacidad para 5 m³/s. Los taludes de diseño fueron 1:1 para membranas flexibles o losas de concreto de 7 cm de espesor y taludes 3:1 para membranas rígidas (Murillo, 1993).

La inversión inicial más económica fue el revestimiento de concreto (\$26.50/m², 8.41 USD/m², valor relativo 1.0); con HDPE de 1 mm de espesor resultó 1.56 a 1.98 veces más costosa y con espesor de 1.5 mm, 2.51 veces mayor; con PVC de 1.0 mm, de 1.27 a 1.35 veces; con CSPE de 0.91 mm, 2.55 veces; y con paneles asfálticos 2.91 veces. No se evaluó el IIR, pero su costo resulta similar al del HDPE. Al considerar la vida probable de cada revestimiento se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 5.12 Precio relativo de revestimientos (Rodrigo Murillo Fernández, 1995)

Material	Espesor (mm)	Esperanza de vida (años)	Importe relativo al concreto
Concreto	70.0	20	1.0
CSPE	0.91	20	2.5
IIR	1.00	15	3.4
PVC	1.00	> 6	4.2 a 4.5
HDPE	1.52	> 10	5.0
HDPE	1.02	> 5	6.2 a 8.0
P. asfálticos	12.7	< 3	19.4

La vida de cada producto ha sido reportada a nivel internacional o determinada por experiencias propias. Por mejoras en la elaboración de geomembrana de PVC y HDPE, es posible que su durabilidad haya aumentado, aunque no existen pruebas al respecto.

Para las secciones hidráulicas mencionadas se estimaron sus pérdidas por filtración a través de los distintos materiales. Si se comparan con un canal sin revestir en suelo ($k=10^{-5}$ cm/s), las pérdidas con revestimiento de concreto se reducen a una tercera parte, con los paneles asfálticos a la décima parte y con membranas de HDPE, CSPE, PVC e IIR son imperceptibles.

Por ser casi lisas las superficies de las geomembranas se supone que la velocidad de flujo y por ende la capacidad de conducción aumentan en forma notable.

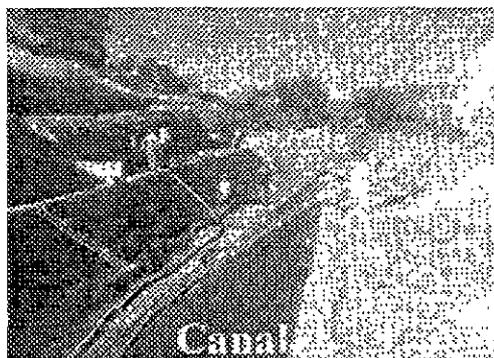


Figura 5.24 Canal con geomembrana

Al comparar con un canal en tierra con taludes 1:1 y sin revestir (Coeficiente de Manning $n=0.022$), la velocidad aumenta 33% en el revestimiento de concreto ($n=0.015$), 40% con CSPE ($n=0.014$) y 43% con revestimiento de PVC ($n=0.0136$). Con taludes 3:1 la velocidad aumenta 43% con PVC y 45% con HDPE ($n=0.0135$); por lo que el aumento en la capacidad de conducción respecto al concreto es sólo de 5 a 12%. Los coeficientes de Manning corresponden a resultados experimentales (Martin et al, 1990).

En México, las geomembranas instaladas de HDPE, PVC, CSPE y geocompuestos de bentonita, tienen una edad máxima de 5 años. A nivel internacional el CSPE ha durado más de 20 años, el hule butilo IIR y el EPDM más de 15 años, el HDPE 10 ó más años y el PVC un mínimo de 6 años. El revestimiento asfáltico Rhino Hide ha tenido una corta vida (3 años).

Las geomembranas utilizadas en el país se han comportado adecuadamente hasta el momento y sólo en el PVC se han observado posibles efectos térmicos y pérdida de integridad en las uniones. En algunas obras se ha presentado el levantamiento de las membranas por falta de un sistema de ventilación de gases del suelo, es decir, han ocurrido fallas por diseño. Con el uso de geomembranas las pérdidas por infiltración resultan insignificantes si se comparan con otros materiales.

La capacidad de conducción en canales revestidos con estos productos aumenta tan solo 5 a 12%, en comparación con el concreto hidráulico. La inversión inicial para revestir un canal con geomembranas resulta entre 1.27 y 2.95 veces mayor comparada con el concreto, pero al considerar su esperanza de vida la inversión es de 2.5 a 20 veces más costosa; por lo que su uso es aceptable sólo bajo condiciones especiales, como ocurre en suelos permeables, expansivos, solubles, erosivos, colapsables o agrietados, donde no se puede utilizar concreto hidráulico, o bien, cuando se requiere proteger a los suelos y acuíferos de la contaminación.

Por su facilidad de instalación y reparación, los productos de PVC, CSPE e IIR son más convenientes que los de HDPE, LDPE y PP que requieren procedimientos especiales. Todas las geomembranas de polímeros, inclusive las más rígidas (HDPE y PP) son susceptibles de sufrir daños por roedores o vandalismo. En todas las aplicaciones de estos productos se requiere revisar la necesidad de instalar sistemas de drenaje de líquidos o de ventilación de gases.

5.3.6 Revestimientos de lagunas artificiales

La experiencia en el caso de revestimientos de lagunas artificiales con concreto hidráulico resulta contradictoria, ya que algunos revestimientos han dado buenos resultados mientras que otros han presentado problemas graves de filtraciones. Los puntos críticos de ésta técnica parecen ser los siguientes:

- Necesidad de un sustrato de apoyo firme
- Composición del concreto que garantice el mínimo agrietamiento por contracción
- Juntas de contracción suficientemente numerosas (cada 6 a 9 m)
- Selladores y "water stops" de buena calidad en las juntas de contracción
- Llenado lento de la laguna para permitir cierta deformación progresiva del revestimiento.



Figura 5.25 Revestimiento del Embalse la Tabona, Canarias

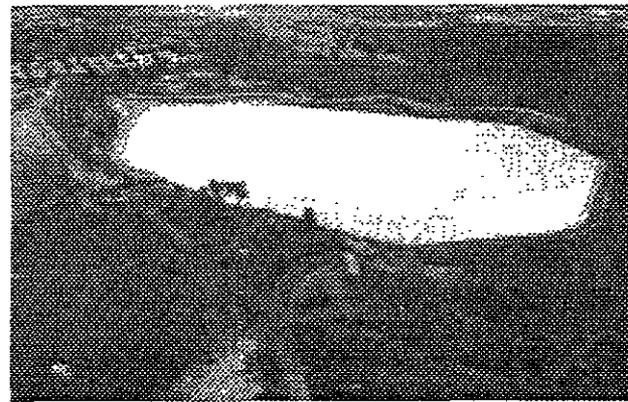


Figura 5.26 Embalse Maerle, California

El empleo de productos sintéticos para el revestimiento de lagunas artificiales se remonta a los años 60's. Las geomembranas plásticas (PVC, PE y sus derivados) y elastoméricas (hule butilo, EPT, EPDM y neopreno) son las más populares cuando se busca obtener una permeabilidad prácticamente nula. Si (pero solamente si) se seleccionan y se instalan adecuadamente, estas membranas resisten el ataque de la mayoría de los productos químicos y dan lugar a filtraciones muy bajas.

Es importante tomar en cuenta que un desgarre o defecto local puede conducir a filtraciones importantes, aún si el terreno subyacente es poco permeable. En efecto, el líquido tiende a fluir horizontalmente en el contacto entre membrana y suelo, lo que aumenta la superficie de absorción del terreno y despega la membrana del mismo si no ha sido lastrada apropiadamente.

El hecho de que no sea posible llegar a una instalación perfecta, aún cuidando los diversos aspectos de laboratorio y control de calidad, ha propiciado que ciertas instituciones definan para los contratistas una fórmula de tolerancia del tipo siguiente para la filtración máxima:

$$Q = 1.6 \times 10^{-5} A H^{1/2}$$

donde Q es la filtración máxima admisible en l/s
A es el área del revestimiento en m²
H es el tirante máximo en m

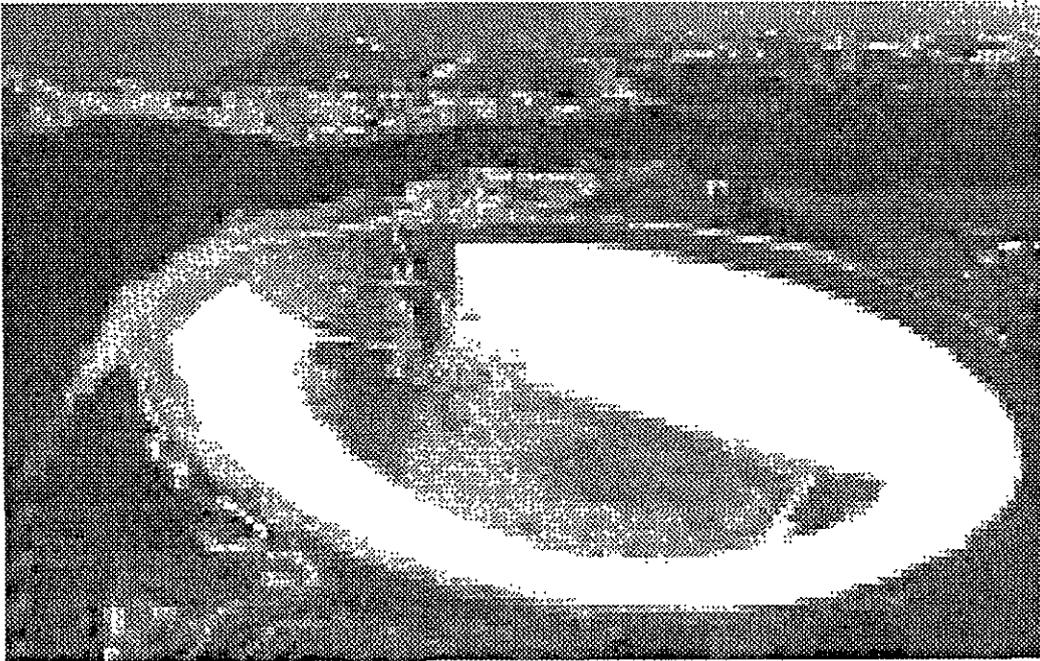
Esta fórmula es bastante liberal puesto que acepta para un tirante de 1 m una fuga correspondiente a un abatimiento de nivel en la laguna de 1 mm/día. Para productos altamente contaminantes este valor podría ser inaceptable.

A continuación se citan algunos criterios de selección para revestimientos sintéticos:

- Alta resistencia a la tensión
- Resistencia a la abrasión, al punzonamiento y a los efectos de agua de desecho
- Buena resistencia al intemperismo; el fabricante garantiza larga vida
- Inmunidad al ataque de bacterias y hongos
- Densidad > 1.0
- Color: negro (para resistir los rayos UV)
- Espesor mínimo de 20 mils (0.4 mm)
- Composición uniforme y ausencia de defectos físicos
- Resistencia a variaciones de temperatura y a condiciones ambientales adversas
- Fácil reparación
- Economía

Los principales aspectos a cuidar durante la instalación de revestimientos sintéticos en lagunas artificiales se mencionan en seguida:

- El revestimiento debe colocarse sobre una estructura estable
- El diseño y la inspección de las instalaciones deben recaer en profesionistas con experiencia en aplicaciones de revestimientos y que dominen la ingeniería geotécnica
- Es recomendable el uso de un sistema de subdrenes que opere a presión atmosférica
- Las especificaciones deben prever una tolerancia para filtraciones
- Los revestimientos impermeables deben colocarse sobre una superficie tersa de concreto, suelo, concreto lanzado o concreto asfáltico
- Salvo para paneles asfálticos, todas las juntas de campo deben hacerse perpendicularmente al pie del talud
- Las obras de toma y de descarga deben sellarse adecuadamente
- Las membranas deben anclarse en la corona del talud
- Se deben sellar todas las picaduras del revestimiento y las grietas del relleno de apoyo
- Los problemas de viento y de gases en membranas delgadas se pueden controlar si se instalan respiraderos como parte integral del revestimiento
- Es conveniente recubrir los revestimientos o cercar los almacenamientos para evitar daños por vandalismo



6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Este trabajo representa una muestra de los avances logrados en el desarrollo tecnológico e industrial de diversos productos, así como las nuevas técnicas de ingeniería que hacen posible la utilización de los mismos.

De acuerdo a un estudio realizado por la Comisión Petroquímica Mexicana perteneciente a la SEMIP (Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal), se sabe que el realizar un proyecto para producir algún plástico de ingeniería en nuestro país, contaría con las siguientes ventajas:

- Cercanía con el mercado más grande del mundo de estos materiales lo que abre perspectivas de exportación.
- En México se cuenta con mano de obra barata.
- Se podrían implementar nuevas aplicaciones específicas de estos materiales para el mercado nacional.
- Amplias posibilidades de integración horizontal y vertical de la cadena productiva a largo plazo.

Aunque el proceso integral de la manufactura de los plásticos de ingeniería es de alta complejidad tecnológica, pues su desarrollo cuesta millones de dólares y años de esfuerzo, se estima que es posible realizarla en el medio industrial mexicano, aún cuando en la actualidad la inversión en equipo y planta de manufactura es mínima.

La implementación de un proyecto para la producción se considera atractiva partiendo de dos premisas íntimamente relacionadas: el apoyo de la empresa que cuenta con la tecnología y la posibilidad de incurrir en mercados extranjeros. El respaldo, apoyo y prestigio de estas empresas (en la mayoría de los casos líderes en el mercado), se considera primordial para lograr el éxito de una probable empresa nacional que produzca tales materiales, lo que favorecería el impulso de desarrollar proyectos en este subsector.

La disponibilidad de resinas de ingeniería en México sería uno de los factores más importantes para inducir el crecimiento del mercado interno de estos materiales; además, se apoyarían planes de inversión y crecimiento que tienen para nuestro país empresas como: Nissan, Xerox, Black and Decker, IBM, Hewlett Packard, Apple, Chrysler, Ford, etcétera.

Las líneas de investigación y desarrollo de este campo que se recomienda apoyar son: materias primas, nuevos productos, equipo y aditivos. Cabe señalar que la creación de nuevos productos está marcada por las necesidades que día a día surgen como resultado del crecimiento de la población y todas sus implicaciones. Los polímeros y su amplia gama de aplicaciones en diversas áreas del conocimiento, han revolucionado todo el proceso de desarrollo mundialmente, pues han sustituido materiales naturales con muy buenos resultados, en ocasiones hasta los han superado. Sus características, algunas veces peculiares, han favorecido su utilización llegando a lo antes inimaginable. Sus aplicaciones abarcan desde lo más sencillo como un palillo de dientes, hasta la evolución de productos complejos (como los geosintéticos) que interactúan con el medio ambiente en obras importantes de ingeniería.

El surgimiento de los geosintéticos generó grandes expectativas en el mundo ingenieril al ser empleados en diversas obras, acortando los tiempos de ejecución y los costos. Los fabricantes de estos productos han tenido que realizar una labor muy ardua de investigación, desarrollo y aplicación de los mismos, para favorecer su comercialización. Cuando aparecieron por primera vez en el mercado, los ingenieros los veían con cierto recelo, pues no había investigación profunda relativa a su comportamiento a largo plazo en obras de ingeniería, existía incertidumbre en cuanto al funcionamiento de estos productos y sólo los atrevidos se arriesgaron a utilizarlos para innovar.

Dado que la respuesta por parte del gremio ingenieril fue poca, los fabricantes se vieron en la necesidad de volverse expertos técnicos de sus productos, se organizaron y con los investigadores e ingenieros que utilizaron sus productos, comenzaron a crear las bases que estimularon el uso paulatino de estos productos.

Al pasar el tiempo y observar que las obras que emplearon geosintéticos tenían un comportamiento estable, con mínimos fracasos y mayores beneficios, su uso comenzó a expandirse. Al principio fueron sólo geotextiles y geomembranas, pero la cada vez mayor aceptación por parte de los ingenieros, provocó un desarrollo creciente de éstos y otros productos alternativos con funciones más específicas que sirvieran de apoyo a los productos ya existentes, o bien, que tuviesen aplicaciones especiales como las georredes, geotubos, geoceldas, etcétera.

Actualmente, existe una gran diversidad de productos geosintéticos, de materiales diferentes con estructuras distintas y por supuesto, con características muy superiores a los primeros; dado que existe mayor experiencia de su uso y sus éxitos. La gama de funciones que pueden satisfacer son muchas, entre las que destacan: separación, drenaje, filtración, protección, impermeabilización y refuerzo.

Estos éxitos generaron una competencia sana entre las empresas fabricantes para satisfacer las necesidades impuestas por el desarrollo mundial y los diversos usuarios. Así mismo, el gremio ingenieril y los fabricantes favorecieron la creación de estándares internacionales de prueba para controlar la calidad y aplicación de estos productos, de modo que se tuviera más confianza al utilizarlos adecuadamente.

En virtud de lo anterior, se crean organismos especiales dedicados a la investigación, documentación, experimentación y difusión de los resultados relativos a los geosintéticos, con el fin de establecer parámetros de uso internacional. Los logros obtenidos por estos productos han contribuido también a un desarrollo en la ingeniería geotécnica, pues se han creado diseños muy caprichosos para proyectos complejos y de grandes dimensiones, como el convertir un pantano en una zona transitable y de recreación (campo de golf en Cancún, Quintana Roo), impermeabilización de lagunas artificiales, impermeabilización de tanques industriales de contención de productos químicos, etcétera.

Por otra parte, la factibilidad del uso combinado de los geosintéticos ofrecidos en el mercado, representa una posible solución a problemas de contaminación del agua, del suelo, del aire, de erosión, de estabilidad, de refuerzo e impermeabilización entre otros; además, permiten el mejoramiento de las propiedades del suelo en diversas aplicaciones, incluso pueden llegar a sustituirlo, lo que repercute en el costo-beneficio del proyecto en cuestión. Los retos que enfrenta el ingeniero son cada vez mayores, pues involucran aspectos como la complejidad del proyecto, el diseño, la construcción y operación, la funcionalidad, la viabilidad, afectación al medio ambiente, impactos a la sociedad, entre muchos más.

Existen diversos aspectos que favorecen la utilización de los productos geosintéticos de los cuales destacan:

La durabilidad, ya que estos productos tienen compuestos que estimulan su larga duración, aún cuando sean atacados por productos químicos, rayos ultravioleta, etcétera. Esto beneficia los resultados a largo plazo al disminuir las frecuentes operaciones de mantenimiento y reparación de la obra, lo que repercute en tiempo, dinero y trabajo (mano de obra y equipo).

La estética, pues los geosintéticos pueden emplearse en proyectos de arquitectura donde se requiere un aspecto agradable del paisaje.

Por ejemplo, el aplicar estos productos para crear taludes con mayor pendiente y muros de contención, mejora fácilmente el paisaje al aumentar la capacidad de los suelos y brindar protección contra la erosión, permitiendo incluso el crecimiento de plantas en los taludes. Además, con la gran cantidad de productos modernos para la construcción disponibles hoy en día, el área del proyecto en cuestión puede transformarse en un deleite visual, haciéndolo atractivo tanto para las comunidades como para las industrias.

En el medio ambiente que como ya se dijo antes, existen muchas aplicaciones de geosintéticos que benefician el medio ambiente; por ejemplo, los rellenos sanitarios, la creación de embalses artificiales, la impermeabilización de canales que conducen aguas contaminadas, la disminución de erosión en talayas con el uso de geotubos, etcétera.

En este trabajo se señalan algunos lineamientos que deben tomarse en cuenta para un adecuado diseño y aplicación de los geosintéticos. Se mencionan algunas entidades que manejan información estandarizada de éstos, con el fin de que sirvan de guía para ampliar el conocimiento fundamentado de los mismos.

También se desarrollan casos específicos de aplicación de estos productos, con el fin de ampliar las expectativas de los lectores respecto a los geosintéticos. Desgraciadamente es tanta la información existente, que es imposible incluir todo lo que se sabe de estos productos, pues están en continuo desarrollo e investigación; sólo se señalan las bases de partida para entender algo de los geosintéticos y sus funciones.

Cabe señalar la importancia que tiene el diseño adecuado de estos productos para que desempeñen las funciones esperadas, por lo que el diseñador debe apoyarse con un experto no sólo de ingeniería geotécnica, sino también de estos productos, para que se retroalimenten y el resultado de la aplicación sea exitoso. Obviamente, deberán seguirse los parámetros de los estándares internacionales que garantizan el buen funcionamiento de los geosintéticos al ser apropiadamente colocados en la obra.

Finalmente, se concluye que los geosintéticos son productos muy versátiles que pueden satisfacer diseños caprichosos y complejos con grandes beneficios de costo y tiempos de ejecución. Es primordial estar bien informado de las características de cada producto y sus variedades, con el objeto de que al diseñar se logre el mejor resultado al seleccionar el producto adecuado para el proyecto en cuestión. Es conveniente, que antes de decidirse por un producto geosintético, se analice también la alternativa geotécnica tradicional (es decir, sin el uso de estos productos), para determinar si realmente se requiere de los productos geosintéticos o se puede prescindir de ellos sin impactar los aspectos económico-ambientales al proceder de forma tradicional.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Vergara Serna, Hermenegildo, Aplicación de los materiales sintéticos en la ingeniería, Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, UNAM México 1986.
- ❖ Keyser, Carl A., Ciencia de Materiales para Ingeniería, Ed. Limusa-Noriega, 1a ed. 1972, 6ª reimpresión México 1990.
- ❖ Thorton, Peter A., Colangelo, Vito J., Ciencia de materiales para ingeniería, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana.
- ❖ Gutiérrez Legorreta, Jaime Zeferino, Criterios de selección de capas impermeables en rellenos sanitarios, Tesis Posgrado de Ingeniería UNAM, México 1998.
- ❖ POLYFELT, Design and Practice Manual for Geotextiles, Third Edition-USA, 3ª reimpresión 1994.
- ❖ Koerner, M. Robert, Designing with geosynthetics, Ed. Prentice Hall, Philadelphia Pennsylvania USA, 3a Edición 1994.
- ❖ Melchor Apodaca, José Rubén, Empleo de geotextiles en el diseño y construcción de sobrecarpetas asfálticas del tramo Puebla-Acatzingo, Tesis Posgrado de Ingeniería UNAM, México 1984.
- ❖ Márquez Barraza, Gisela E. G., Estabilización de suelos con geotextiles, Tesis Posgrado de Ingeniería UNAM, México 1981.
- ❖ Guy, A. G., Fundamentos de Ciencia de Materiales, Ed. Mc-Graw-Hill, México 1980.
- ❖ Holtz, R.D., Traducción: Manuel García López, Geosintéticos para el mejoramiento de suelos, Seminario Taller sobre Geosintéticos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Mayo 1993.
- ❖ Simposio sobre Geosintéticos. Geotextiles y Geomembranas, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), AC; Editor Rodrigo Murillo F, Julio 1990.
- ❖ A.S.C.E., Geosynthetics for soil improvement, Nashville, Tennessee May 9, 1988.
- ❖ Industrial Fabric Association International, Geotextile Division, Geotechnical Fabrics Report Specifier's Guide 1990, Industrial Fabric Association International, Geotextile Division, USA 1990.
- ❖ Morales y Monroy, Rafael, Impermeabilización de Lagunas, IMTA, México, Septiembre 7 de 1995.
- ❖ Auvinet, Gabriel; Esquivel Raúl, Impermeabilización de Lagunas Artificiales, SMMS, Ed. Limusa, México 1986.
- ❖ TENAX, Ingeniería Moderna. Guía rápida de geosintéticos, Certificación ISO 9002 (UNI/EN 29002).
- ❖ García López, Manuel, Introducción al Diseño de Obras Civiles con Geosintéticos, Escuela Colombiana de Ingeniería, Ingeniería y Geosintéticos Lida, Mayo 1993.
- ❖ Askeland, Donald R., La ciencia e ingeniería de los materiales, Ed. Grupo Editorial Iberoamericana, México 1987.

- ❖ Morales y Monroy, Rafael, Las Geomembranas y geotextiles en los rellenos sanitarios, PIVIDE, Marzo 1997.
- ❖ Flinn, Richard A.; Trojan, Paul K., Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones, Ed Mc-Graw-Hill, 1ª ed. 1979, en español 1985.
- ❖ Dumond, T.C., Materiales Técnicos, Ed. Dossat, S.A. Madrid 1963.
- ❖ Zbigniew, D. Jastrzabski , , Naturaleza y Propiedades de los materiales para ingeniería, Jastrzabski, Lafayette College, Ed. Nueva Editorial Iberoamericana SA de CV, 2ª ed. 1979.
- ❖ IGS Secretariat, Recommended Descriptions of Geosynthetic Functions, Geosynthetic Terminology, Mathematical and Graphical Symbols, February 1998.
- ❖ Leal, Marina; Chávez, Valentina; Larralde, Laura, Temas Ambientales. Zona Metropolitana de la Ciudad de México, D.D.F., SEMARNAP, PUMA, Gob. Edo. México, Diciembre 1996.
- ❖ A.S.T.M. Designación D 123-93a, Terminología Estandar para Textiles, A.S.T.M., Noviembre 1993.
- ❖ Environmental Protection Agency , Technical Guidance Document: Inspection Techniques for the fabrication of geomembrane field seams, United States, May 1991.
- ❖ Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Instituto de Ingeniería UNAM, Vocabulario de Mecánica de Suelos, Ed. Limusa Noriega Editores, 1ª reimpresión 1988.
- ❖ Mitchel, J. K.; Katti, R. K., X ICSMFE. Reportes Generales. Mejoramiento del suelo, Estocolmo 1981.
- ❖ Schlösser, F., Magnan, J. P., Holtz, R.D., XII ICSMFE. State of the Art II. Construction Géotechnique, San Francisco 1985.
- ❖ Vázquez González, Alba; César Valdez, Enrique, Impacto Ambiental, IMTA - Facultad de Ingeniería UNAM, 1ª ed. México 1994.
- ❖ Murillo Fernández, R., Evaluación de geomembranas. X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos de Ingeniería en Cimentaciones, Vol. 2, 1ª ed., SMMS SA, SIMSIC, ISSMFE, Guadalajara 1995.
- ❖ Bressi, D. R.; Paredes, L., Geosintéticos y protección ambiental en Chile, X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos de Ingeniería en Cimentaciones, Vol. 2, 1ª ed., SMMS SA, SIMSIC, ISSMFE, Guadalajara 1995.
- ❖ ANIQ, Anuario estadístico de la industria química mexicana, ed. 2000.
- ❖ Comisión Petroquímica Mexicana, Plásticos de Ingeniería, SEMIP, México 1988.
- ❖ Muñoz Sánchez, Alberto, Residuos sólidos plásticos, tratamiento y reciclado, Madrid 1980.
- ❖ Felix Robledo de, Pedro; Luis Martín, Vicente, Aplicación de los plásticos en la agricultura, Ed. Mundi Prensa, Madrid España 1981.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Hornbostel, Caleb, Materiales para la construcción. Tipos, usos y aplicaciones, Ed. Limusa-Noriega, México 1999.
- ❖ Lasheras Esteban, J. M., Sánchez-Marín Pizarro, J. M., Tecnología de los materiales industriales, Ed. CEDEL, 3ª ed., Barcelona 1971.
- ❖ Enciclopedia del Plástico, IMPI, 1ª ed. México 1996-1997.
- ❖ Avendaño Sarmiento, Luis, Iniciación a los plásticos, Ed. Centro Español de Plásticos, 1ª ed., Barcelona 1992.
- ❖ Ingeniería para el control de residuos municipales industriales, SA de CV, Promoción del buen manejo de los residuos sólidos municipales, SEDESOL, México 1995.
- ❖ POLYFLEX, POLYFLEX Specifications. HDPE, Dura Flex VLDPE.
- ❖ Folletos técnicos diversos de geosintéticos.