

24
2 ej



Universidad Nacional Autónoma de México

CAMPUS ARAGON

GEOMEMBRANAS

FALLA DE ORIGEN

T E S I S
Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL
P r e s e n t a
GABRIEL ESPINOZA TELLEZ

ASESOR: ING. RODRIGO MURILLO FERNANDEZ

1 9 9 5



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
ARAGÓN
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

GABRIEL ESPINOZA TÉLLEZ
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 5 de junio del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. RODRIGO MURILLO FERNÁNDEZ pueda dirigirse el trabajo de Tesis denominado "GEOMEMBRANAS", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México., 8 de junio de 1995
EL DIRECTOR



M. en I. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO

c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/11a.



A mis padres Gabriel y Laura

Por su apoyo incondicional, con el cual pude cursar una carrera universitaria que culmina con este trabajo dedicado a ellos.

A mi hermana Laura Gabriela

En quien he confiado a lo largo de muchos años y en los momentos difíciles me ha escuchado y alentado para seguir adelante.

Geomembranas

Índice

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Los nuevos materiales de ingeniería (los geosintéticos)	3
1.1.1	Descripción de geosintéticos	4
1.2	Polímeros	6
1.2.1	Formulaciones de los polímeros	9
1.2.1	Identificación de los polímeros	11
1.3	Geotextiles	12
1.3.1	Historia	12
1.3.2	Manufactura	12
1.4	Geomembranas	16
1.4.1	Historia	16
1.4.2	Manufactura	16
1.5	Otros geosintéticos	20
1.5.1	Geotredes	20
1.5.2	Geomallas	21
1.5.3	Geomembranas de arcilla	21
1.5.4	Geotubos o tubos de plástico	22
1.5.5	Geocompuestos	23
Capítulo 2	Propiedades de las geomembranas	25
2.1	Propiedades físicas	27
2.1.1	Espesor	27
2.1.2	Densidad	27
2.1.3	Masa (unidad por unidad de área)	28
2.1.4	Transmisión de vapor de agua (tva)	28
2.2	Propiedades mecánicas	30
2.2.1	Comportamiento a la tensión (prueba índice)	30
2.2.2	Comportamiento a la tensión (ancho uniforme)	30
2.2.3	Comportamiento a tensión multiaxial /reventamiento)	30
2.2.4	Resistencia al rasgado	31
2.2.5	Resistencia en las juntas	31
2.2.6	Resistencia al impacto	31
2.2.7	Resistencia al punzonamiento	32
2.2.8	Fricción geomembrana-suelo	33
2.2.9	Anclaje de la geomembrana	33
2.2.10	Esfuerzo al agrietamiento	34
2.3	Propiedades de durabilidad	36
2.3.1	Degradación ultravioleta	36
2.3.2	Degradación radioactiva	36
2.3.3	Degradación biológica	37
2.3.4	Degradación química	37
2.3.5	Degradación	38

Capítulo 3	Aplicaciones de las geomembranas	41
3.1	Contenedores líquidos (estanques)	42
3.1.1	Secciones típicas	42
3.1.2	Selección de la geomembrana	43
3.2	Cubiertas para estanques	45
3.2.1	Cubiertas fijas	45
3.2.2	Encapsulado	45
3.2.3	Cubiertas flotantes	46
3.3	Canales	47
3.3.1	Selección del material	47
3.4	Tanques subterráneos	48
3.4.1	Tanques de poco volumen	48
3.4.2	Tanques de gran volumen	48
3.4.3	Cisternas	49
3.5	Aplicaciones geotécnicas de las geomembranas	50
3.5.1	Presas de tierra	50
3.5.2	Presas de concreto	50
3.5.3	Túneles	51
3.6	Depósitos de desechos sólidos	52
3.6.1	Secciones típicas	55
3.6.2	Selección del material	56
3.7	Cubiertas	59
3.7.1	Barreras impermeables	60
Capítulo 4	Instalación y control de calidad	61
4.1	Selección del material	61
4.2	Instalación	67
4.2.1	Preparación de la superficie	67
4.2.2	La geomembrana en campo	67
4.2.3	Colocación en campo	69
4.2.4	Condiciones climatológicas	69
4.2.5	Despliegue o extendido	69
4.3	Uniones de las geomembranas	70
4.3.1	Proceso térmico	70
4.3.2	Proceso con solventes	75
4.3.3	Uniones de membrana de bentonita	76
4.3.4	Pruebas de las juntas	78
4.3.5	Pruebas destructivas	78
4.3.6	Pruebas de cortante (shear) y separación (peel)	80
4.3.7	Pruebas no destructivas	83
4.4	Sistema de anclaje	86
4.5	Daños y reparaciones	88

4.6	Control de calidad de fabricación (MQA), aseguramiento de calidad de fabricación (MQA), control de calidad en la construcción (CQC) y aseguramiento de calidad en la construcción (CQA).	89
Capítulo 5	Costos	91
5.1	Datos de diseño	92
5.2	Costos de revestimiento con membrana de hule butilo (IBR)	95
5.3	Costos de revestimiento con membrana de PVC	99
5.4	Costo de revestimiento con membrana de HDPE	102
5.5	Costo de revestimiento con geomembrana de bentonita (GCL)	104
5.6	Recomendaciones	106
Capítulo 6	Conclusiones	110

1 Introducción

A principios de la década de los ochenta surgen nuevos productos de ingeniería, para controlar el flujo del agua por filtraciones; éstos son hechos a base de resinas plásticas (polímeros) y de arcilla, los cuales son llamados geomembranas.

En un principio se utilizaban como materiales impermeables los suelos finos compactados, pero las nuevas membranas con su reducida permeabilidad ($k < 10^{-11}$ cm/s), vinieron a sustituir a estos últimos en muchos de las obras donde se requiere de un material impermeable.

Sin embargo, ningún material es totalmente impermeable y las geomembranas son materiales que sólo minimizan las pérdidas por filtraciones en los sistemas donde se decida usar estos productos, La decisión de revestir un sistema con geomembranas u otro material debe ser analizada con gran cuidado, principalmente por el elevado costo que éstos implican y deben analizarse también las condiciones de servicio que será sometido el producto.

En la actualidad se encuentran diversos y mejores productos para resistir los rayos ultravioletas y en general las condiciones del medio ambiente, entre los cuales tenemos el polietileno clorosulfonado (CSPE), el hule butilo (IIR), el polietileno de alta densidad (HDPE), el cloruro de polivinilo (PVC), entre otros; los registros de esperanza de vida de las membranas en campo se han obtenido por experiencias reales como el IIR que tiene una esperanza de vida de al menos 15 años y es un producto que se fabrica en nuestro país con una duración registrada de 10 años.

En este trabajo, se reportan los procedimientos básicos para producir los polímeros o resinas plásticas, que sirven para la elaboración de los geosintéticos y se dividen como: geotextiles, geomembranas y otros productos relacionados.

En particular, este trabajo se enfoca principalmente a las geomembranas, que son recubrimientos sintéticos impermeables a fluidos y partículas que se utilizan en ingeniería geotécnica; se describen también sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad, las cuales se requieren

Capítulo 1

conocer para su uso adecuado que depende de las condiciones de servicio del producto; estas propiedades son evaluadas por medio de ensayos de laboratorio que establece The American Society for Testing Materials (ASTM) u otras instituciones.

Las principales aplicaciones de las geomembranas son en las obras hidráulicas, donde se necesita reducir las filtraciones; para evitar éstas se debe llevar acabo una rigurosa supervisión durante la instalación de las geomembranas (desplegado y junteo) y aún después de ésta; se debe prestar atención en las uniones, ya que no debe haber fugas a través de ellas, por lo que deben realizarse pruebas de control que dependen del tipo de sello para evaluar la calidad de las uniones.

El revestir un sistema con geomembranas implica un alto costo, principalmente si se necesita cubrir éste con otro material para protegerlo de las condiciones del medio ambiente; por esta razón se analizan los costos de varios materiales para revestir un canal para riego de 4000 m de longitud con capacidad para 5 m³ con geomembrana expuesta al intemperie sin ser cubiertos por otro material; los costos varían por el precio de los materiales; y al utilizar un talud 1:1 para membranas flexibles y 3:1; también se analizó el costo con geomembrana de arcilla (GCL), aunque se necesite cubrir con una capa mínima de 30 cm de suelo; por último se propone el producto óptimo para este sistema en particular al igual que las recomendaciones.

1.1 Los nuevos materiales de ingeniería (los geosintéticos)

Una gran variedad de nuevos productos ha emergido para la comunidad de ingenieros civiles, los cuales han sido usados con buen resultado en sus aplicaciones. Las razones de la explosión de estos nuevos productos son numerosas, algunas pueden ser las siguientes:

- Tienen un control de calidad durante la fabricación.
- Pueden ser instalados rápidamente.
- Generalmente pueden reemplazar recursos naturales, lo cual es favorable al medio ambiente.
- El uso de estos productos es en ocasiones requerido por la ley.
- Generalmente tienen costos competentes al uso de productos naturales.
- Son encontrados con amplia distribución en el mercado.

Las áreas más influenciadas por estos productos son la ingeniería geotécnica, la ingeniería del transporte y la Ingeniería ambiental, aunque también en algunas otras áreas se pueden aplicar, estos productos son los geosintéticos.

En el término geosintético la palabra geo se refiere a tierra y la segunda parte de la palabra, sintéticos, se refiere a materiales exclusivamente hechos por el hombre.

The American Society for Testing Materials (ASTM) ha definido geosintético como:

Producto plano manufacturado con polímeros, usados con tierra, suelo, roca u otros materiales, en la ingeniería geotécnica, como una parte integral de un proyecto, estructura o sistema hecho por el hombre.

Los materiales usados en la manufactura de geosintéticos provienen casi en su totalidad de la industria del plástico, éstos son primordialmente polímeros derivados del petróleo, aunque otros

Capítulo I

como las fibras de vidrio y algunos materiales naturales son usados también en la producción de éstos.

1.1.1 Descripción de geosintéticos

Los arqueólogos afirman que en el sur de Inglaterra, 2500 años antes de Cristo, se utilizaron varas y ramas para hacer caminos en zonas pantanosas. Los romanos tejían entre sí las ramas antes de colocar piedras; en China y en otros países orientales, fueron usadas camas de bambú para reforzar el suelo y el concepto de reforzar los suelos pobres ha continuado hasta los presentes días; su función es reforzar y evitar la incrustación de materiales de préstamo en la construcción de caminos, bordos, chinampas, etc. El empleo de telas con estos fines, se inicia en el presente siglo y los primeros textiles fabricados específicamente para obras de ingeniería civil aparecen a principios de los años setenta; se adoptan entonces los términos geotextil y geomembrana como denominación de materiales elaborados con polímeros que se emplean en la ingeniería civil; en la década de los ochenta se desarrollan las georredes, geomallas y los geodrenes, productos que representan la segunda generación de geosintéticos y que fueron diseñados para satisfacer necesidades particulares en obras realizadas en todo el mundo.

La primera ocasión en que se usó un geotextil para reforzar caminos fue por el departamento de caminos del Sur de Carolina en el año de 1926, donde se utilizaron telas de algodón impregnadas de asfalto con el propósito de reforzar a las carpetas asfálticas y construir una barrera impermeable que impidiera el paso del agua; antes que la tela se deteriorara, los resultados enseñaron que los caminos se encontraban en buenas condiciones y que ésta reducía el agrietamiento de la capa asfáltica; este proyecto aclaró los conceptos de separación y reforzamiento de los materiales geosintéticos; como segunda función de un material intermedio entre dos materiales distintos, tiene el propósito de drenar el agua y filtrar en el suelo. La grava y la arena bien graduadas tienen esta propiedad naturalmente y han sido usadas como material filtrante desde tiempos ancestrales; la tercera función que puede cumplir un geosintético es proveer una barrera impermeable para prevenir el movimiento de un líquido de un lado a otro.

Capítulo 1

Los revestimientos hechos con asfalto o cementos han sido usados desde principios de siglo, los cuales han sido sustituidos paulatinamente por el uso de hules y plásticos a partir de los años cuarenta. En la actualidad, existen nuevos materiales de barrera que combinan materiales sintéticos y suelos llamados geocompuestos.

Los geosintéticos cumplen principalmente con cinco funciones: separación, reforzamiento, filtración, drenaje y barreras de líquidos. El uso de materiales geosintéticos tiene principalmente dos objetivos: hacer un mejor trabajo (no deteriorar el medio ambiente) y hacerlo más económico (a través de bajos costos o de gran durabilidad).

Las principales familias de geosintéticos son:

- Geotextiles
- Geomallas
- Georretes
- Geomembranas
- Geomembranas de arcilla (GCL's)
- Geotubos
- Geocompuestos

1.2 Polímeros

La palabra polímero proviene del griego polys, la cual significa algunos y mero que significa partes; esto es que los polímeros consisten de algunas partes unidas entre moléculas de carbono e hidrógeno para hacer una sola; cada una de estas partes es llamada monómero, la cual es un compuesto molecular usado para producir los polímeros.

La reacción química tiene lugar dentro de un recipiente llamado polimerizador o reactor que está equipado con un mecanismo de agitación y es controlado térmicamente. A temperatura y presiones normales, el monómero se presenta como un gas y por tanto debe manejarse en forma líquida a bajas temperaturas y altas presiones; la reacción va acompañada por la generación de gran cantidad de calor, el cual se disipa mediante un sistema de enfriamiento interconstruido en el recipiente de reacción; posteriormente, pasa a un proceso de extrusión (figura 1.2a), que consiste en hacer pasar los gránulos de plástico por un barril o cañón metálico en cuyo interior gira un tornillo sin fin, el cual mezcla, funde y comprime el material, transportándolo de un extremo a otro del cañón, la masa fundida se somete a temperaturas gradualmente mayores mediante resistencias eléctricas colocadas a lo largo del cañón; el plástico fundido es obligado a pasar a través de un molde con la forma deseada.

El peso molecular del material depende del grado de la polimerización; esto hace cambiar las propiedades de los polímeros. Los incrementos de peso y las unidades moleculares repetidas hacen este producto diferente, por ejemplo, incrementando el promedio del peso molecular da como resultados:

- Incremento en la resistencia
- Incremento en la elasticidad.
- Incremento a la resistencia al impacto.
- Incremento del esfuerzo de agrietamiento.
- Incremento de la resistencia al calor.

Mientras una mayor cantidad de los polímeros usados en la manufactura de un geosintético están hechos de una clase de monómero, los cuales son llamados homopolímeros, hay otras posibilidades; esto es, si repetimos unidades en cadena, que es llamada copolímero, podemos formar varios tipos de polímeros; ésta es la razón que existan alrededor de 30,000 patentes de polímeros en los Estados Unidos. Afortunadamente, sólo algunos polímeros se usan para realizar los geosintéticos. En la tabla 1.1 podemos encontrar la lista de las unidades moleculares y los tipos de geosintéticos hechos por polímeros específicos.

El vínculo entre las moléculas de los polímeros y sus cadenas es crítica en su comportamiento y desempeño; uno de estos aspectos es el vulcanizado o "crosslinking" el cual es una importante característica porque ésta divide a los dos mayores tipos de polímeros (termoplásticos y termoestables). Un polímero termoplástico es el que puede ser rápidamente calentado hasta un punto de suavizarlo y ser trabajado y después enfriarlo y volver a remodelar a cualquier forma; en un polímero termoestable el proceso no puede ser repetido, el calentamiento después de la primera fusión puede causar una degradación en el material. La clave del comportamiento en los materiales termoestables es el vulcanizado (crosslinking), el cual no existe en los materiales termoplásticos.

Algunos ejemplos de materiales termoplásticos son el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliéster (PET), cloruro de polivinilo (PVC); los materiales termoestables son: hule butilo (IIR), neopreno (CR), hule epíclorohidríno (CO o ECO) y monómero dieno propileno etileno (EPDM). Como observamos, en la tabla 1.1 la mayoría de los geosintéticos son materiales termoplásticos; sólo hay algunos materiales termoestables que son usados en las aplicaciones geosintéticas.

La cristalinidad puede existir en los polímeros, ya que hace ampliar las variaciones en los grados de ésta; la aleación de algunas porciones de polímeros en pequeñas regiones son llamadas cristalinas, la cantidad de la cristalinidad da la clasificación de polímeros, denocristalino, amorfo y contra semicristalino, las cuales son las tres clasificaciones de polímeros que pueden ser usados por materiales geosintéticos los cuales son:

Capítulo I

TABLA 1.1 Unidades repetidas de polímeros en la manufactura de geosintéticos (Koerner 1994)

Polímero	Unidades repetidas	Tipo de geosintético	
Poliétileno	- h - h -	Geotextiles	Geotubo
	- c - c -	Geomembrana	Georred
	- h - h - n	Geomalla	Geocompuesto
Polipropileno	- h - ch ₃ -	Geotextil	
	- c - c -	Georred	Geomembrana
	- h - h - n	Geocompuesto	
Cloruro de polivinilo	-h - cl	Geomembrana	
	- c - c -	Geotubo	Geocompuesto
	h - h - n		
Poliéster	o - o	Geotextil	Georred
	- o - r - o - c - r' - c - n		
Poliamida	h - h - o - o	Georred	Geocompuesto
(nilón 66)	- n - (ch ₂) ₆ - n - c - (ch ₂) ₄ - c - n		

- Termoplásticos
- Termoplásticos semicristalinos
- Termoeestables

La mayoría de los polímeros usados en la manufactura de geosintéticos son de las dos primeras variedades. La cantidad de cristalinidad varía desde 0 hasta 30% en algunos cloruros de polivinilo (PVC) y tan alta como 70% en polietileno de alta densidad (HDPE); la cristalinidad es significativa y en algunos casos crítica en el comportamiento de los geosintéticos, el incremento de cristalinidad da como resultados lo siguiente:

- Incremento en la dureza.
- Incremento en la resistencia al calor.
- Incremento en la deformación a tensión.
- Incremento en la resistencia química.
- Decremento en la flexibilidad.
- Decremento de la resistencia al esfuerzo

1.2.1 Formulaciones de los polímeros

Los materiales geosintéticos no son 100% resinas de polímeros del tipo asociado con el nombre; en todos los casos las resinas primarias están formuladas con aditivos, rellenos, extrusores, plastificantes y otros agentes; los aditivos tanto sólidos como líquidos son usados como colorantes, absorbente de luz ultravioleta, plastificantes, retardantes de flama, estabilizadores térmicos, lubricantes y otros; el resultado de esta mezcla puede ser homogénea o heterogénea, dependiendo de los parámetros de solución de los aditivos, entre los más comunes son los siguientes:

- Carbonato de calcio
- Negro de humo.
- Hojuelas y granulosos de vidrio.
- Bióxidos.

Capítulo 1

- Hojuelas metálicas.
- Silicalos
- Minerales de sílica como el cuarzo.
- Óxidos metálicos como la alúmina.
- Otros polímeros sintéticos.

Aditivos líquidos más comunes

- Plastificantes.
- Colorantes.
- Rellenos

El resultado de la mezcla de varios productos son descritos en la tabla 1.2; los más comunes polímeros usados en la manufactura de geosintéticos son:

TABLA 1.2 Polímeros geosintéticos más comunes y sus formulaciones aproximadas (Koerner 1994)

Tipo de polímero	Resina	Rellenos	Negro de humo	Aditivos	Plastificantes
Poliétileno	97	0	2.0-3.0	0.5-1.00	0
Polipropileno	95	0	2.0-3	01.0-2 0	0
Cloruro de polivinilo	80	10	5.0-10	2.0-3.0	0
Cloruro de polivinilo (plástico)	35	25	5.0-10.0	2.0-3.0	30-35
Poliéster	97	0	2.0-3.0	0.5-1.0 0	0
Nión	97	0	2.0-3.0	0.5-1.0	0

1.2.2 Identificación de los polímeros

Hay un sin número de caminos por los cuales nosotros podemos identificar un polímero específico; uno de éstos es por medio de un análisis químico. Los análisis de los materiales geosintéticos se hacen principalmente por las siguientes razones:

- Son usados para un certificado de calidad.
- Son usados para encontrar un tiempo estimado en la durabilidad.
- Son usados para la investigación de laboratorio dentro de los mecanismos de degradación y el tiempo de durabilidad.
- Son usados para el descubrimiento de nuevos estabilizadores y aditivos.
- Son usados para descubrir nuevos productos y nuevas aplicaciones de investigación de geosintéticos

Los más frecuentes análisis químicos aplicados a los polímeros usados en la manufactura de geosintéticos son:

- Análisis termogravimétrico (TGA)
- Análisis termomecánico (TMA)
- Análisis mecánico dinámico (DMA)
- Determinación del peso molecular

1.3 Geotextiles

1.3.1 Historia

Los geotextiles fueron usados por primera vez para el control de la erosión y fueron la alternativa de filtros granulares de suelo que son usados aún en la actualidad; estos productos fueron fabricados en telas de filtro Barrett en 1966 con su fibra clásica, la cual fue utilizada en obras de control de erosión.

A finales de los años sesenta Rhone Poulenc en Francia empezó a trabajar con diferentes aplicaciones, la principal fue la separación y el reforzamiento, sin embargo los primeros trabajos con geotextiles deben asignarse a los holandeses y a los ingleses.

Las fibras ICI fueron las de mayor influencia en el uso de textiles no tejidos con una amplia variedad de productos y usos. Otras grandes compañías son la Polyfelt en Austria y Du Pont; los europeos y norteamericanos son los líderes en la tecnología de los geosintéticos. En la actualidad podemos encontrar un gran número de firmas las cuales han continuado con la introducción de nuevos geotextiles.

1.3.2 Manufactura

Cuando se manufacturan los geotextiles son tres los puntos principales para la elaboración de los geotextiles, que son el tipo de polímero, tipo de fibra y el estilo de fabricación.

Los polímeros más usados en la manufactura de las fibras de geotextiles en orden descendente son los siguientes

- Polipropileno 83 %
- Poliéster 14 %

Capítulo 1

- Polietileno 2 %
- Nilón 1%

El polímero básico está hecho de hilos que consisten de una o más fibras, las cuales son producidas por el proceso de extrusión, previamente descrito en el capítulo 1.2; para la producción de la fibra, los filamentos son obligados a fluir a través de un Spinneret que es una especie de regadera; mediante la aplicación de tensión se reduce la sección transversal del filamento; la intención es hacerlos dúos y solidificarlos bajo los tres principales métodos que son húmedo, seco y el de ablandado; la mayoría de los geotextiles se elaboran bajo este último método.

El endurecimiento es por enfriamiento y simultáneamente las fibras son extendidas; alargando éstas se reduce el diámetro de las fibras y hace que las moléculas de los polímeros que forman cadenas muy largas, se arreglen o acomoden por sí mismas, a este efecto se le denomina orientación molecular

Estos monofilamentos pueden ser combinados para formar hilos con multifilamentos, el diámetro de la fibra es caracterizada por el denier, unidad que es el peso en gramos de 9000 m de hilo y el tex que es el peso de 1000 m de hilo.

La fibra textil se produce de diferentes formas por filamentos continuos de diferente peso y largo, una de estas es llamada tow, la cual puede contener miles de filamentos continuos.

El último tipo de fibra es llamado split que se produce por diferentes capas de polímeros y son cortados por lo que resultan como cintas, las principales fibras usadas en la manufactura de los geotextiles son las siguientes (figura 1.1a)

- Monofilamentos.
- Multifilamentos.
- Fibra de hilo

Capítulo 1

- **Monofilamentos Slit-film.**
- **Multifilamentos Slit-film**

Una vez que los hilos han sido hechos, estos deben mandarse a las fábricas en donde deciden si serán tejidos o no tejidos; dentro del grupo de los tejidos podemos encontrar los siguientes:

- **Tejidos planos;** este es el tipo más simple y común.
- **Tejido de canasta;** usa uno o más hilos entrelazados.
- **Tejido cruzado;** los hilos están tejidos en diagonal y cruzados.

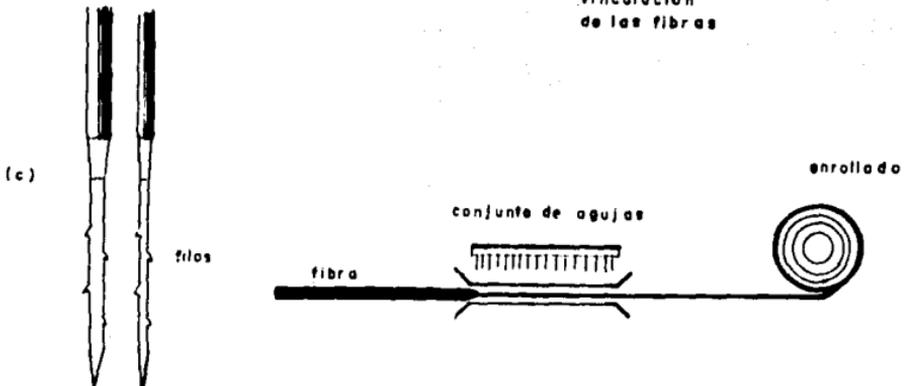
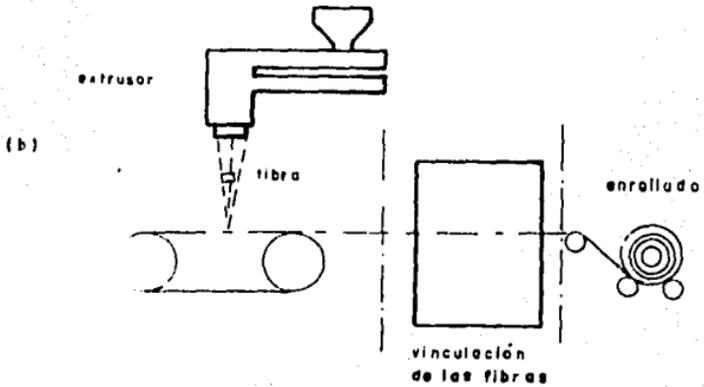
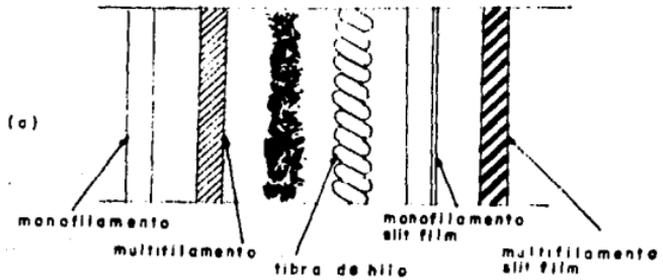
Cada proceso en la manufactura consta de 4 aspectos que son: la preparación de la fibra, formación del tejido, entrelazado y proceso final.

El proceso de la obtención de geotextiles tejidos se realiza en maquinaria convencional de textiles, la cual realiza diferentes tipos de tejidos, con ciertas propiedades las cuales pueden ser hidráulicas o mecánicas de los geotextiles, ya que los elementos individuales se entrelazan en disposición geométrica regular y perpendicularmente uno respecto con otro; la manufactura de los no tejidos es muy diferente de los mencionados previamente.

Después de haber sido fabricados los filamentos por el proceso del extrusión, se lleva a cabo la fabricación del geotextil no tejido por dos procesos principales, termosellados o entrelazado mecánico, en el primer proceso los filamentos se orientan en forma irregular distribuyéndolos en todos los sentidos; el sellado o unión por fusión se logra pasando el material entre rodillos calientes (calandreo) uniendo las fibras donde se cruzan.

En el proceso mecánico se fabrican por medio de la acción de agujas que entrelazan las fibras entre sí; algunas veces se les imparte un acabado de impregnación; esto aumenta la resistencia a la tensión y el módulo de resistencia a la perforación, por último se debe aplicar un secado especial para establecer la permeabilidad.

FIGURA 1.1 Tipos de hilos de polímero usadas en la fabricación de geotextiles (a) Diagrama del proceso de manufactura de los geotextiles no tejidos, termosellados (b) o entrelazado mecánico (c)



1.4 Geomembranas

1.4.1 Historia

En 1938 Goodyear vulcanizó un hule natural con azufre, lo cual dio como resultado un hule sintético que es un polímero termoestable. En la actualidad la mayoría de las producciones de sintéticos son los materiales de hule o elastómeros.

La geomembrana creada por Goodyear fue usada para revestir un estanque de agua potable, uno de los primeros materiales usados fue el polietileno; su producción se inició en 1943, principalmente en industrias empacadoras; las primeras membranas de polietileno fueron usadas en Europa y posteriormente en Estados Unidos ya que en esa época los norteamericanos usaban como geomembrana cloruro de polivinilo. Las membranas de PVC fueron usadas en un principio en canales, aunque una de las primeras geomembranas fue la de polietileno clorosulfonado (CSPE) en los años sesenta. En la actualidad podemos encontrar gran variedad de geomembranas alrededor del mundo.

1.4.2 Manufactura

La manufactura de geomembranas comenzó con la producción de los materiales base, los cuales son resinas de polímeros con aditivos como antioxidantes, plasticidas, negro de humo y lubricantes, desde las plantas químicas se envían al fabricante de las membranas. En la planta procesadora se recibe la resina y se mezcla con otros ingredientes para obtener las propiedades deseadas; el mezclado es una de las etapas más importantes en la fabricación de los revestimientos sintéticos.

Ninguna receta o proporcionamiento se puede desarrollar en forma tal que dé lugar a todas las propiedades deseables, esto se debe a que las propiedades físicas y químicas están relacionadas entre sí, cada vez que se mejora una propiedad, alguna otra se perjudica, regla que se aplica tanto a los plásticos como a los elastómeros.

Capítulo 1

En la planta procesadora, las membranas se obtienen por laminado en caliente (calandreo) por extrusión, o por aplicación del producto sobre una tela de soporte (spread coating).

Todas las membranas de polietileno de alta densidad (HDPE) y muy baja densidad (ULDPE) son manufacturadas por el método de la extrusión en el cual la resina y aditivos son mezclados, proceso que fue descrito previamente en el capítulo 1.2

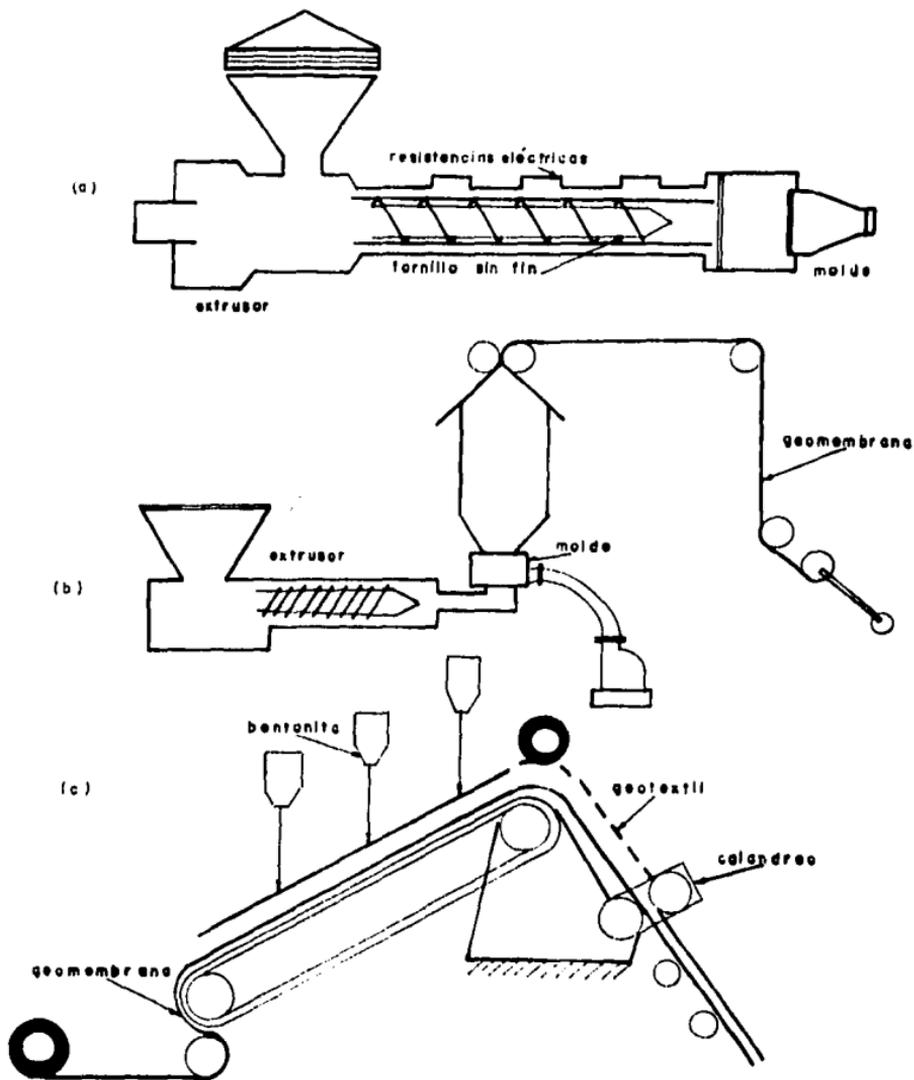
Hay dos variantes para fabricar las geomembranas, una de estas es el plano llamado cast sheeting, la cual pasa la formulación a través de dos moldes planos horizontales donde es controlado el espesor de ésta, que puede ser entre 0.75 y 3.00 mm y el ancho el cual puede ser entre 1.8 y 4.6 m y cuando se colocan dos extrusores paralelos podemos obtener una geomembrana de 9.1 m de ancho.

La segunda variación es llamada blown film la cual hace pasar la formulación a través de dos moldes concéntricos orientados verticalmente; al salir la geomembrana formada se hace pasar por un mecanismo de rodillos donde es cortada longitudinalmente y enrollada.

Todas las geomembranas de PVC y CSPE son fabricadas por el método de laminado en caliente; en este método el polímero, el negro de humo y otros aditivos son mezclados y calentados, lo cual crea una reacción entre los componentes; los materiales son sacados por un transportador a un molino donde es ablandado y pasado a través de dos rodillos para formar una hoja. Otro método en la fabricación de geomembranas es producirlas sobre una tela de soporte (spread coating), en la cual la formulación del polímero es aplicada sobre una tela de soporte.

Las geomembranas terminadas pueden tener diferentes estructuras, para evitar los orificios debidos a defectos de fabricación; las geomembranas más gruesas se obtienen frecuentemente superponiendo varias hojas y en ocasiones se refuerzan intercalando entre ellas una o dos telas de refuerzo; 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 con tela son las siguientes :

FIGURA 1.2 Diagrama de un extrusor para la obtención del polímero (a) Proceso de extrusión tipo Blown Film para geomembranas (b) Diagrama de la manufactura de geomembrana de arcilla (c)



Capítulo 1

- Estabilidad contra el punzonamiento.
- Estabilidad contra la contracción.
- Mayor resistencia al desgarre.

Las telas de refuerzo que tienen más aceptación son a base de políester, nilón, polipropileno y fibra de vidrio. El nilón tiene algunos inconvenientes, pero aún así sigue siendo el material más aceptado para refuerzo de geomembranas. Su principal atractivo es su fácil disponibilidad y su resistencia a soluciones acuosas y organismos del suelo; como desventajas deben mencionarse su baja resistencia a las soluciones ácidas, a la luz solar y su falta de adherencia a cualquiera de los polímeros. La rapidez del deterioro del nilón 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 exhiben una buena resistencia a los ácidos y a la luz solar y se han convertido en competidoras del nilón, sin embargo, tampoco tienen propiedades adhesivas hacia los materiales que constituyen las membranas.

1.5 Otros geosintéticos

1.5.1 Georredes

Hoy en día la mayor función de las georredes es el reforzamiento. La abertura entre las nervaduras o costillas son suficientemente largas para permitir el paso del suelo a través de un lado a otro de las georredes; las nervaduras de las georredes son un más duras que las fibras de los geotextiles.

Los georredes originales fueron hechas en el Reino Unido por Nelon, Ltd, y traídas a los Estados Unidos en 1982.

El polímero usado en la fabricación de georredes es normalmente el polietileno de alta densidad o el polipropileno; las georredes usan principalmente poliéster por sus componentes resistentes y son unidas con algún otro material como PVC, látex, etc.

El proceso de producción se inicia cuando se estiran las láminas de polietileno o polipropileno y se le realizan perforaciones para posteriormente someter el material al calentamiento y orientación mediante rodillos giratorios en serie que jalan el material, obligándolo a elongarse en el sentido de la tracción, hasta conseguir un incremento en la resistencia. Cuando se lleva a cabo en un solo sentido, se producen las georredes uniaxialmente orientadas, que tienen aberturas en forma de elipse; para la elaboración de las mismas se emplea el polietileno de alta densidad. Cuando el proceso de orientación se lleva a cabo sobre láminas de polietileno de alta densidad y se orientan tanto en el sentido longitudinal como en el sentido transversal, se ha fabricado una georred biaxialmente orientada, con aberturas casi cuadradas. El área de aplicación por excelencia de este tipo de geosintéticos es la de refuerzo.

Las georredes no orientadas son fabricadas al igual que el tipo de georredes orientadas por el método de extrusión, con filamentos gruesos de plásticos y se disponen en arreglos geométricos regulares, formando redes cuyas aberturas típicas son del orden de 8 x 8 mm, aunque existen otros

tamaños. Al no ser orientadas, no son aplicables para reforzar, pero poseen altos valores de transmisibilidad, por lo que su uso se limita a la conducción de líquidos, funcionando como drenes y se denominan geomallas.

1.5.2 Geomallas

Las geomallas fueron inventadas por Brian Mercer Presidente de Netlon LTD en el Reino Unido, quién fue el primero en patentar el producto junto con el proceso de fabricación. Este plástico ligero, comúnmente es visto en los supermercados al cargar frutas o vegetales. La diferencia entre las georredes y las geomallas no es el material o la configuración sino la función; claramente se observa que las primeras son primordialmente para el refuerzo y la segundas son más débiles pero se usan para drenar.

Las geomallas son usadas comúnmente con un geotextil, geomembrana u otro material en la parte interna y externa para prevenir que las partículas tapen las aberturas de éstas.

La mayoría de las geomallas son fabricadas con polietileno, el cual se encuentra en el rango de media densidad a alta densidad; son fabricadas por el proceso de la extrusión y quedan formados por dos grupos de filamentos paralelos gruesos que se intersectan entre ángulos de 60 y 90 grados.

1.5.3 Geomembrana de arcilla

Los geosintéticos con capas de arcilla son barreras hidráulicas que consisten en una capa de bentonita encapsulada con algún geotextil (entrelazado mecánico o punzonado) o una geomembrana (figura 1.2c); son conocidos con las siglas de GCL (Geosynthetic clay liners) y su función ingenieril es servir de barrera hidráulica para el agua u otros líquidos; actualmente los GCL son usados como remplazo de otras capas de arcilla compactada o geomembranas.

Su primer uso fue en los Estados Unidos en 1986 en un depósito de desechos sólidos, con un producto llamado Claymax que es una capa de bentonita entre dos capas de geotextiles.

Capítulo 1

diferente junto con mayores ventajas sobre los rígidos.

En el área de tubos de plástico enterrados, cerca del 95% de las transmisiones en las líneas de gas están hechas en tubos de plástico, generalmente de polietileno de alta densidad.

Hay un gran número de polímeros que son usados en la fabricación de tubos de plástico como PVC, polietileno de alta densidad y polipropileno; los tubos son fabricados por el proceso de extrusión y pasando por un molde circular con un círculo, el cual determina el diámetro y espesor; sólo se producen tubos de ciertas medidas y espesores, pero en cambio se pueden lograr secciones con diferentes acabados en las paredes interiores que son:

- CPP Tubo de plástico corrugado.
- CPP S Tubo liso por el interior pero corrugado en el exterior.
- CPP C Tubo corrugado por adentro .
- CPP SP Tubo con perforaciones.
- CPP CP Tubo corrugado con perforaciones

1.5.5 Geocompuestos

La filosofía básica del uso de los materiales en una geomembrana es el combinar las mejores propiedades de diferentes materiales para resolver un problema específico de la mejor manera. Los geocompuestos son generalmente materiales sintéticos (pero no siempre); en algunos casos hay más ventajas al usar materiales que no son sintéticos, por el costo o por las funciones que desempeñan.

Las funciones de los geocompuestos son las mismas que todos los geosintéticos la separación, reforzamiento, drenaje y crear barreras impermeables.

Capítulo 1

Compuestos de geomallas y geotextiles. Cuando es colocado un geotextil debajo de una geomalla para hacer un sandwich geotextil-geomalla-geotextil, la función de separación y filtración siempre es satisfactoria, pero la función de drenar resulta sumamente mejorada por los geotextiles colocados horizontalmente; el compuesto georred-geotextil hace excelente la función de drenar agua en movimiento hacia arriba en zona de capilaridad, cuando el esfuerzo es mayor en una helada o cuando la migración de sales es un problema. Cuando el líquido entra en el sandwich, ésta viaja horizontalmente dentro de la geomalla y lejos de donde pueda ocurrir algún daño, por esta razón los geocompuestos han sido usados en los depósitos de desechos sólidos por ser buenos conductores de vapor.

Compuesto geotextil-geomembrana. Los geotextiles están laminados en uno o ambos lados de una geomembrana con el propósito de refuerzo. Los geotextiles proveen un aumento en la resistencia al punzonamiento, rasgado y fricción.

Compuesto de geomallas-geomembranas. Desde que algunos tipos de geomembranas y geomallas pueden ser hechas del mismo material (polietileno de alta densidad) éstas pueden ser unidas para formar barreras impermeables con mejores características a la resistencia y la fricción.

2 Propiedades de las Geomembranas

De acuerdo con la ASTM D4833, una geomembrana está definida como:

Capa sintética con muy baja permeabilidad o barrera, usada en la ingeniería geotécnica con algún material relacionado para el control de migración de un fluido en un proyecto, estructura o sistema hecho por el hombre.

Las geomembranas son láminas muy flexibles hechas de polímeros; también pueden ser hechas con geotextiles, asfalto del tipo oxidado u algunos otros geocompuestos. Entre los plásticos o polímeros más comunes que se utilizan para fabricar las geomembranas son :

TABLA 2.1 Plásticos o polímeros más usuales usados para la fabricación de las geomembranas.

Termoplásticos	Termoplásticos cristalinos
Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliétileno de Muy Baja Densidad (VLDPE)
Cloruro de Polivinilo resistente al petróleo (PVC-OR)	Poliétileno de Baja densidad (LDPA)
Poliamida o Nilón (PA)	Poliétileno de Media Densidad (MDPE)
Cloruro de Polivinilo-Nitrato termoplástico (TN-PVC)	Poliétileno de Alta Densidad (HDPE)
Aleación Interpolímero Etileno (EIA)	Aleación de Poliétileno de Alta Densidad (HDPA-A)
Aleación Interpolímero Etileno Reforzada (EIA-R)	Polipropileno (PP)
	Polioléfina Elastazida (PO, ELPO o 3110)
	Poliéster Terftalato (PET)

Elastómeros termoplásticos

Poliétileno Clorado (CPE)
Aleación de Poliétileno Clorado (CPE-A)
Poliétileno Clorosulfonado o Hypalon (CSPE)
Monómero Dieno Propileno Etileno Termoplástico
(T-EPDM)
Terpolímero Propileno Etileno (EPT)

Elastómeros termoestables o hules

Isobutileno isopreno o Hule Butilo (IIR)
Monómero Dieno Propileno Etileno (EPDM)
Policloropreno o Neopreno (CR)
Hule Epiclorohidrina (CO o ECO)

Estos materiales, usados en la fabricación de geomembranas, tienen una permeabilidad relativamente baja, pero al compararla con otros materiales como los suelos finos, podemos considerar a los primeros como materiales prácticamente impermeables.

Los valores de permeabilidad y de la permeabilidad equivalente en la prueba de transmisión de vapor de agua de las geomembranas varía entre 0.5×10^{-10} y 0.5×10^{-13} cm/s. Con estos rangos de permeabilidad se crea una barrera de líquidos o vapores, que es la más importante función de una geomembrana.

En este capítulo describiremos las propiedades de las geomembranas y mencionaremos algunos pruebas que se les aplican; las propiedades que describiremos las podemos dividir en tres grupos que son: físicas, mecánicas y de durabilidad.

2.1 Propiedades físicas

2.1.1 Espesor

El espesor es determinado por una sencilla medición; la norma D5199 de la ASTM describe la forma de medición de las geomembranas, ésta es realizada con un micrómetro bajo una presión de 0.203 kg/cm^2 ; las geomembranas reforzadas normalmente son fabricadas en láminas sencillas con espesores entre 0.25 y 0.38 mm; también se calandrea dos láminas para formar geomembranas con espesores entre 0.91 y 1.14 mm

2.1.2 Densidad

La densidad o gravedad específica de una geomembrana depende del material base del cual está hecha; las encontramos de gran variedad, pero siempre del mismo polímero genérico, por ejemplo, las densidades del polietileno son de muy baja densidad, baja densidad lineal, densidad media y alta densidad. La densidad para todos los polímeros de las geomembranas se encuentran en los rangos entre 0.85 y 1.5 g/cm^3 ; de acuerdo a la clasificación del ASTM para HDPE, las resinas requieren una densidad mayor o igual a 0.941 g/cm^3 ; sin embargo, todas las geomembranas comercialmente disponibles de HDPE usan resinas de polietileno entre 0.934 y 0.938 g/cm^3 , densidad que corresponde al polietileno de media densidad (MDPE), al adicionar negro de humo y aditivos a la formulación, se incrementa la densidad a 0.941 g/cm^3 , unidad que es usada en la industria de las geomembranas de HDPE, pero que en realidad son hechas por resinas de MDPE.

2.1.3 Masa (peso por unidad de área)

El peso de la geomembrana es la masa por unidad de área; para calcularlo se utiliza una unidad de área de un espécimen representativo, pesado para obtener los gramos por metro cuadrado. Esta prueba está descrita en la norma D1910 de la ASTM.

2.1.4 Transmisión de vapor de agua (tva)

Nada es absolutamente impermeable, pero las geomembranas se acercan a esta propiedad. Para realizar la prueba que se especifica en la norma E96 de la ASTM, intervienen varios factores, como el espesor de las geomembranas; algunos resultados de esta prueba se muestran en la siguiente tabla, donde se indican valores de permeabilidad de las geomembranas más comunes.

TABLA 2.2 Valores de permeabilidad en la prueba de transmisión de vapor de agua (Koerner 1994)

Material de la geomembrana	Espesor mm	Resultados de tva	
		g/m ² día	perm-cm
PVC	0.52	4.4	1.2×10^{-2}
	0.52	2.9	1.4×10^{-2}
	0.76	1.8	1.3×10^{-2}
CPE	0.53	0.64	0.32×10^{-2}
	0.79	0.32	0.24×10^{-2}
	0.97	0.56	0.51×10^{-2}
CSPE	0.89	0.44	0.84×10^{-2}
EPDM	0.51	0.27	0.13×10^{-2}
	1.23	0.31	0.013×10^{-2}
HDPE	0.8	0.017	0.013×10^{-2}
	2.44	0.006	0.014×10^{-2}

Capítulo 2

Cuando el líquido es otro diferente del agua existe un factor que debe ser considerado; este factor es las moléculas del líquido que se atraen con las moléculas del revestimiento, lo cual altera el resultado en las pruebas de permeabilidad de transmisión de vapor de agua; el laboratorio donde se realizan

estas pruebas debe tomar en cuenta si el uso de la geomembrana será para contenedores de químicos o depósitos de desechos sólidos, ya que en estas condiciones de servicio es donde se presenta este fenómeno. Las pruebas se realizan en cámaras de vapor o permeámetros cuando se requiere la medición de la permeabilidad.

2.2 Propiedades mecánicas

Existen varias pruebas mecánicas que son aplicadas para determinar la resistencia de los polímeros, propiedad que es fundamental para las condiciones de servicio de una geomembrana.

2.2.1 Comportamiento a la tensión (prueba índice)

Para determinar la resistencia a la tensión existe una gran cantidad de pruebas que son usadas rutinariamente por el control de calidad en la manufactura de las geomembranas; los procesos de la prueba en las geomembranas son las D638, D822, D751 de la ASTM; generalmente se prueba un espécimen de 10.16 cm de ancho x 10.16 cm de largo, sujetado con mordazas; posteriormente es probado hasta la falla en una máquina de prueba de deformación constante o de incremento constante de carga.

2.2.2 Comportamiento a la tensión (ancho uniforme)

Hay un parámetro especial que se presenta en la prueba anterior, que es una contracción dentro de la región central creando un comportamiento unidimensional; este comportamiento no es el mismo que se presenta en campo, por lo que se puede realizar la prueba D4885 de la ASTM o de muestra ancha.

2.2.3 Comportamiento a la tensión multiaxial (reventamiento)

Esta situación es creada por un comportamiento a la tensión de las geomembranas cuando existe deformación ocasionada por un esfuerzo fuera del plano y la deformación es localizada debajo de la geomembrana; este tipo de comportamiento se presenta cuando una geomembrana es usada como cubierta anclada como en los depósitos de desechos sólidos.

2.2.4 Resistencia al rasgado

La resistencia al rasgado es la fuerza requerida para evitar la propagación de una rotura o corte preestablecido, la cual es evaluada por las normas D2263, D1004, D751, D1424, D2261 y D1939 de la ASTM.

Uno de los métodos más usados es el rasgado trapezoidal que consiste en insertar una muestra de la geomembrana en forma trapezoidal en una máquina de prueba de tensión, con el objetivo de llevarla hasta la falla, propiciando el rasgado.

La resistencia al rasgado depende principalmente del tipo de geomembrana; entre las más comunes podemos mencionar las no reforzadas que tienen una resistencia al rasgado entre 4 y 30 lb, en cambio, las reforzadas tienen valores entre 20 y 100 lb.

Esta prueba es de gran importancia, ya que el riesgo del rasgado puede presentarse durante el traslado e instalación por lo tanto, debe tenerse un cuidado extremo durante estos procedimientos.

2.2.5 Resistencia en las juntas

En las uniones, las geomembranas pueden debilitarse más que en las propias membranas; existen uniones que pueden realizarse en campo y otras en las fábricas donde se producen y se obtiene un mejor control de calidad. Las pruebas para determinar la resistencia de las uniones que se aplican a las geomembranas están descritas en las normas D751, D4437, de la ASTM; éstas serán descritas posteriormente en el capítulo 4

2.2.6 Resistencia al impacto

Al dejar caer un objeto sobre una geomembrana puede dañarla, creando una perforación y causar fugas o propiciar el desgarre; es por eso la necesidad de realizar pruebas al impacto; éstas son especificadas en las normas de la ASTM :

Capítulo 2

- ASTM D 1709 (para objetos de caída libre)
- ASTM D 3029 (D1822 prueba con péndulo)

Como observamos, hay dos tipos de pruebas según el impacto; cuando se utiliza un péndulo se realiza la prueba Spencer, la cual es una adaptación de la prueba de resistencia al rasgado llamada Elmendorf (D1424 de la ASTM). Al realizar la prueba Spencer el péndulo golpea la geomembrana y se mide la profundidad que se incrusta el péndulo en ésta.

TABLA 2.3 Resistencia al impacto método Spencer D1424 de la ASTM en (ft/lb) (Korner 1994)

Geomembrana	Angulo del punto geométrico				
	15 grad.	30 grad.	45 grad.	60 grad	90 grad
PVC 20 mm	4.8	6.6	11	> 15.6	>15.6
PVC 30 mm	6.8	10	13.5	>15.6	>15.6
HDPE 40 mm	5.6	6.9	8.3	8.3	6.4
EPDM 36 mm	8.6	8.8	10.8	14.4	>15.6
reforzada 10 x 10					
CSPE 36 mm	9.6	9.4	10.3	14.2	>15.6
reforzada 10 x 10					

grad = gradientes

Las geomembranas con gran espesor ofrecen una mayor resistencia al impacto que las geomembranas reforzadas

2.2.7 Resistencia al punzonamiento

La prueba al punzonamiento está descrita en la norma D5494 de la ASTM; sin embargo, los fabricantes recomiendan la D4833; este tipo de prueba se debe realizar, ya que las geomembranas son propensas a ser perforadas por objetos punzantes propiciando fugas; los valores para la resistencia a la perforación es entre 10 y 100 lb para las no reforzadas y para las reforzadas entre 50 y 500 lb; cuando las geomembranas son compuestas con un geotextil se

Capítulo 2

incrementa la resistencia al punzonamiento; esto se debe a que el geotextil absorbe la carga antes de que llegue a la geomembrana.

2.2.8 Fricción geomembrana-suelo

La fricción que existe entre el suelo y la geomembrana es crítico por el propio diseño de las geomembranas cuando son colocadas en taludes. En muchas ocasiones han ocurrido fallas en los taludes de algunos sistemas, principalmente cuando se colocan cubiertas de suelo sobre geomembranas; sin embargo, las geomembranas también pueden fallar al moverse una superficie de baja fricción debajo de ésta. Para realizar esta prueba se realiza una adaptación de la prueba de ingeniería geotécnica para determinar la fricción de suelo, la prueba es especificada en la norma D5321 de la ASTM; en la actualidad podemos encontrar gran variedad de productos que sirven de interfaz para incrementar la fricción entre geomembranas y otro tipo de superficies (suelo y geosintéticos), en la tabla 2.4 se observan diferentes valores de fricción; la primera parte de la tabla muestra que los ángulos de fricción del suelo a geomembrana fueron siempre menores que el coeficiente de fricción interna del mismo suelo y que las geomembranas lisas y duras de HDPE son las de menor valor friccionante; en cambio las rugosas y suaves CSPE-R y EPDM-R tuvieron altos valores a la fricción; la segunda parte de la tabla muestra los valores de fricción de geotextiles a geomembranas usando los primeros en la parte de arriba o abajo de la geomembrana y obteniendo como resultado el menor valor de fricción cuando se usan las geomembranas lisas y duras con geotextiles lisos; en la tercera parte de la tabla se muestran los valores de fricción entre suelo y geotextiles, ésta combinación es necesario usarla en los diseños de taludes de algunos sistemas, colocando geotextiles abajo o arriba del revestimiento.

2.2.9 Anclaje de la geomembrana

En algunas situaciones una geomembrana es confinada entre dos materiales y posteriormente tensionada por una fuerza externa; en un revestimiento de geomembrana, se ancla en una zanja y es ahí donde se presenta este esfuerzo.

2.2.10 Esfuerzo al agrietamiento

Prueba descrita en la norma D1694 de la ASTM, es para polietileno. El esfuerzo de agrietamiento es definido como una ruptura externa en un plástico causado por un esfuerzo a la tensión.

TABLA 2.4 Valores friccionantes y eficiencia (Murillo 1994)

(a) Ángulos de fricción suelo a geomembrana

Geomembrana	Tipos de suelos		
	Arena de concreto	Arena de Ottawa	Arena de mica-esquistos
	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 28^\circ$	$\phi = 26^\circ$
EPDM-R	24° (0.77)	20° (0.6)	24° (0.91)
PVC			
Rugoso	27° (0.88)		25° (0.96)
Liso	25° (0.81)		21° (0.79)
CSPE-R	25° (0.81)	21° (0.72)	23° (0.87)
HDPE	18° (0.56)	18° (0.58)	17° (0.83)

(b) Ángulo de fricción de geomembrana a geotextil

Marca del geotextil	Geomembranas				
	EPDM-R	PVC rugoso	PVC liso	CSPE-R	HDPE
CZ 600	23°	23°	21°	15°	8°
TYPAR 3401	18°	20°	18°	21°	11°
POLYFILTER X	17°	11°	10°	9°	6°
500 X	21°	28°	24°	13°	10°

(c) Ángulo de fricción suelo a geotextil

Marca del geotextil	Tipos de suelos		
	Arena de concreto	Arena de Ottawa	Arena de mica-esquistos
	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 28^\circ$	$\phi = 26^\circ$
CZ 600	30° (1.0)	26° (0.92)	25° (0.96)
TYPAR 3401	26° (0.84)		
POLYFILTER 3401	26° (0.84)		
500 X	24° (0.77)	24° (0.84)	23° (0.87)

2.3 Propiedades de durabilidad

Existen varios agentes que dañan la estructura de las geomembranas como son los de largo plazo, los cuales serán analizados en este capítulo.

2.3.1 Degradación ultravioleta

La energía de la luz solar puede penetrar la estructura del polímero causando rompimiento en las cadenas moleculares; este daño se presenta en menor grado que en los geotextiles, debido a ciertos componentes que actúan como protectores contra los rayos ultravioletas, como el negro de humo o algunos otros estabilizadores químicos; si uno desea estimar el tiempo de vida a la exposición solar de una geomembrana, el laboratorio debe acelerar este fenómeno y el procedimiento de la prueba está descrito en las normas G26 y G5 de la ASTM; debido a lo difícil del procedimiento de las pruebas, encontramos otro tipo de pruebas, las D1435 y D4364 de la ASTM; para aumentar la intensidad de la energía solar se utilizan espejos y así poder acelerar el procedimiento de la degradación ultravioleta.

En algunos sistemas las geomembranas son expuestas siempre a la intemperie, principalmente a los rayos ultravioletas; es por eso que las geomembranas deben presentar ciertas garantías de los fabricantes por arriba de los 15 años de durabilidad, propiedad que podemos encontrar en geomembranas de CSPE-R, IIR y HDPE.

2.3.2 Degradación radioactiva

Este tipo de degradación es ocasionada por radioactividad alta desde 10^0 hasta 10^7 rads; esta intensidad de rads causa la degradación en los polímeros; sin embargo, este nivel de radiación es demasiado alto al que podemos encontrar en sistemas que utilicen geomembranas; existen casos que se puede presentar un bajo grado de radiación como en los depósitos de desechos sólidos o los depósitos subterráneos de uranio en los cuales podremos usar geomembranas de HDPE, la cual es la más resistente a este tipo de degradación.

2.3.3 Degradación biológica

En el subsuelo se encuentra una gran variedad de organismos vivos que en cierta manera pueden afectar las geomembranas.

Uno de los agentes de la degradación biológica son los animales, principalmente los roedores como las ratas, quienes pueden atacar las geomembranas enterradas en el suelo; desgraciadamente, no hay ningún tipo de pruebas para determinar la resistencia a este ataque, su resistencia sólo depende del espesor, dureza y la fuerza de las mismas geomembranas para evitar este tipo de degradación; los roedores algunas veces son asustados a las geomembranas por componerse de plásticos que utiliza proteínas y los roedores lo ven como alimento; también existen organismos unicelulares que pueden atacar a la geomembrana; los podemos encontrar en más de 1 millón por gramo de suelo y participan en todo tipo de transformación orgánica; estos organismos son las bacterias; el procedimiento de la prueba para evaluar la resistencia de los plásticos a la bacteria es la G22 de la ASTM; las bacterias degradan los polímeros, pero hacen fallar los sistemas de drenaje, los cuales son construidas en conjunto con las geomembranas, debido a la obstrucción.

2.3.4 Degradación química

La resistencia química de una geomembrana es muy importante y a veces lo más crítico para el diseño de un sistema, por lo tanto, la garantía de los fabricantes debe ser confiable; esto a servido para que los fabricantes hagan sus propias pruebas y den ciertos parámetros de resistencia a algunos agentes químicos; estos resultados los observamos en la tabla 2.6; sin embargo, no podemos confiar plenamente en este datos, ya que hay un gran número de parámetros que no se toman en cuenta durante las pruebas; un ejemplo de esto podría ser cuando se presenta más de un agente químico en los contenedores, o cuando los contenedores deben almacenar los productos más tiempo de lo que son probados previamente en laboratorio.

El material más resistente a los solventes químicos es el polietileno de alta densidad (HDPE), por lo que generalmente es el más usado para este tipo de servicios.

2.3.5 Degradación térmica

Existen varias propiedades de los polímeros que son afectadas por los cambios de temperatura, tanto por el calor como por el frío. Los materiales de las geomembranas expuestos por mucho tiempo a los rayos ultravioletas son afectadas en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas; la magnitud de este cambio depende del tiempo expuestas al sol.

La prueba D794 de la ASTM determina los efectos del calor sobre los plásticos, este tipo de falla ocurre como un cambio de apariencia, peso, dimensiones u otras propiedades que alteran el material a un grado no aceptable para su servicio.

TABLA 2.5 Coeficiente térmico de expansión térmica (Koerner 1994)

Tipo de polímero	Expansión térmica lineal x 10 ⁻⁶ 1° C
Poliétileno de alta densidad	11.0-13.0
media densidad	14.0-16.0
baja densidad	10.0-12.0
muy baja densidad	15.0-25.0
Polipropileno	5.0-9.0
Cloruro de polivinilo sin plastificante	5.0-10.0
PVC con 35 % de plastificante	7.0-25.0
Poliámidas	
Ni6n 6	7.0-9.0
Ni6n 66	7.0-9.0
Poliéster	9.0-9.0

El comportamiento de los materiales en el ambiente frío es completamente diferente al de ambiente con calor, ya que no presentan ningún decremento en sus propiedades debido al frío, por lo que se han realizado instalaciones en el Antártida con cierto éxito; el único gran problema son las condiciones de instalación por las condiciones climáticas que se presentan y las geomembranas pierden su flexibilidad; bajo condición de frío a calor se presenta la contracción o

Capítulo 2

o expansión del material, que se determina mediante el llamado coeficiente de expansión térmica; para determinar este coeficiente se aplican las pruebas D2102 y D 2259 para la contracción y las D1042, y 1204 para la expansión, todas de la ASTM. Algunos valores de expansión térmica se dan en la tabla 2.5

Tabla 2.6 Resistencia química de las geomembranas (Koerner 1994)

Químico	Tipos de geomembranas											
	IRR 100 ° F 158 ° F	CPE 100 ° F 158 ° F	CSPE 100 ° F 158 ° F	CO o ECO 100 ° F 158 ° F	EPDM 100 ° F 158 ° F	CR 100 ° F 158 ° F	Poliétileno 100 ° F 158 ° F	PVC 100 ° F 158 ° F				
Generales												
Hidrocarburos alifáticos		X	X		X	X		X	X	X	X	
Hidrocarburos aromáticos					X	X		X	X	X	X	
Solventes cloradosX	X			X	X	X		X	X			
Solventes oxigenados	X	X			X	X	X	X	X	X	X	
Solventes del petróleo			X	X	X	X		X	X	X	X	
Alcohol	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acidos												
Orgánicos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Inorgánicos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bases												
Orgánicas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Inorgánicas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Metales pesadosX	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sales	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X = Generalmente buena resistencia.

3 Aplicaciones de las geomembranas

Por ser México un país con petróleo y con una industria petroquímica en expansión, con clima árido a semiárido en gran parte de su territorio, las geomembranas a base de materiales asfálticos o polímeros deberían utilizarse en mayor grado, ya que existe en el mercado una oferta adecuada de geosintéticos impermeables; a pesar de ello, han sido empleados en pocas obras hidráulicas.

Sus principales aplicaciones se encuentran en almacenamientos para agua potable, canales, rellenos sanitarios y de sólidos peligrosos, lagunas de aguas residuales, trincheras impermeables, cubierta de rellenos, etc. Al usar geomembranas se busca eliminar las filtraciones al máximo posible; sin embargo, es importante saber que aún con los mejores productos no puede existir la absoluta seguridad de que se alcanzará este objetivo; en efecto, la calidad de una geomembrana no puede ser superior a la de su más grave defecto de fabricación o de su peor junta realizada en campo; aunque la confiabilidad del sistema depende de las propiedades de las geomembranas, principalmente se basa en el control de calidad de la fabricación del producto y su instalación.

La clasificación de las geomembranas se realiza por su forma de fabricación y la presencia o ausencia de refuerzo interno, por lo tanto se distinguen: elaboradas en el lugar sin refuerzo, en que se aplican por aspersión, asfalto o polímeros en estado líquido directamente sobre suelos y concretos; elaboradas en el sitio con refuerzo, se aplica por aspersión el producto impermeabilizante sobre un geotextil; elaboradas en planta sin refuerzo, fabricados por medio de extrusión, calandreo o por aspersión sobre una hoja de soporte; y elaboradas en planta con refuerzo, producidas por aspersión del polímero sobre un geotextil o por calandreo con éste.

3.1 Contenedores líquidos (estanques)

La Agencia de Protección al Ambiente (EPA) en Estados Unidos estima que existen 200,000 depósitos superficiales que almacenan diferentes tipos de líquidos, peligrosos y no peligrosos; dada la necesidad de almacenar estos líquidos, las geomembranas han tenido una gran participación en estos sistemas.

En la década de los años cuarenta se revestían los estanques con PVC y se colocaba sobre éste un revestimiento de suelo de 30 cm, sin embargo, tenían tendencia a agrietarse progresivamente por la pérdida de plasticidad del material, ocasionada por la volatilización, dificultad que se solucionó al crear una nueva formulación con altos pesos moleculares de PVC que sustituyó a los primeros revestimientos usados.

3.1.1 Secciones típicas

En la figura (3.1a) se muestra un estanque con revestimiento de geomembrana sobre un suelo previamente compactado y con un sistema de anclaje; a simple vista es muy sencillo realizar un sistema como éste, pero no siempre se encuentran condiciones tan favorables, la primera complicación que surge es por la exposición atmosférica que puede degradar a la geomembrana, por el efecto de la luz ultravioleta o el daño que ocasionan las temperaturas extremas y el vandalismo entre otras; esto hace que en la mayoría de los revestimientos se requiera una cubierta de 30 cm de suelo, figura (3.1b) donde se observa que una cubierta de suelo ha sido colocada sobre la geomembrana, que se extiende hasta el anclaje; la cubierta de suelo al ser colocada sobre la geomembrana puede presentar problemas en los taludes, causado por la falta de fricción entre la geomembrana y el suelo; sin embargo, una solución es el uso de un geotextil debajo de la

Capítulo 3

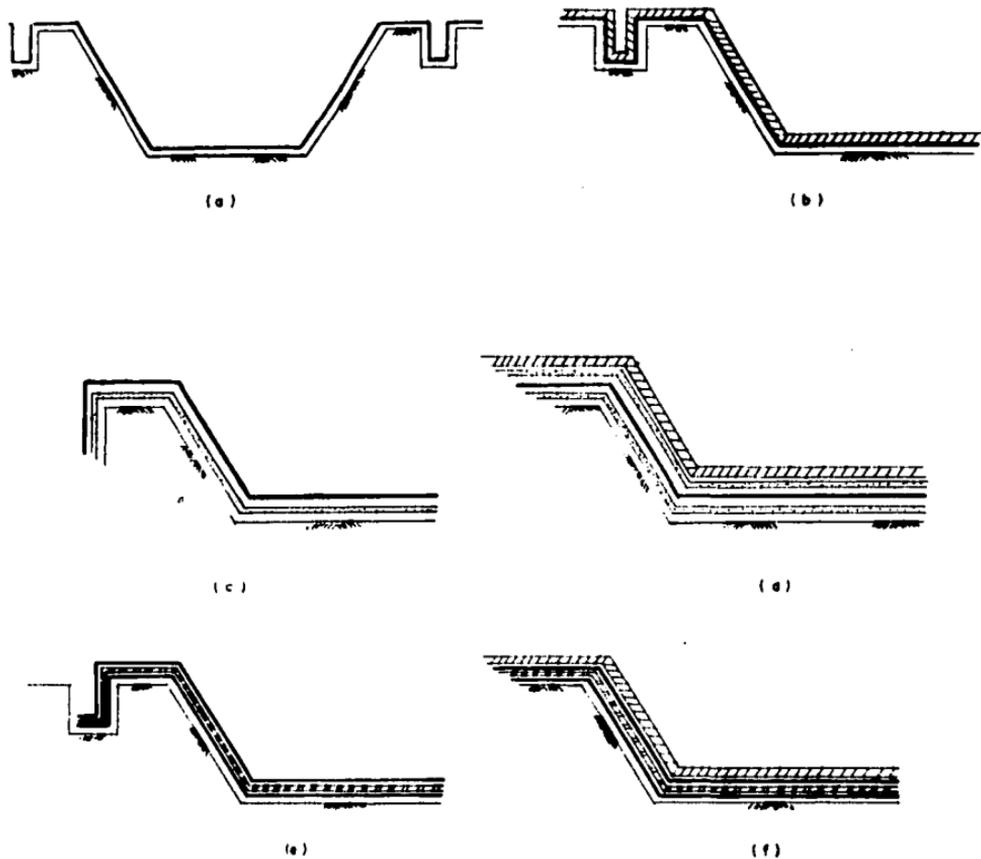
geomembrana, como se muestra en la figura (3.1c), que es colocado directamente sobre el suelo compactado, esta solución es considerada como una buena alternativa por numerosas razones, como son: incremento a la resistencia al punzonamiento, mejoramiento de la fricción entre el suelo y el revestimiento.

En la figura (3.1d) se muestra la protección de la geomembrana entre dos geotextiles en forma de sandwich; el geotextil inferior tiene la misma función señalada anteriormente y cuando la geomembrana es cubierta con suelo, el geotextil superior sirve para mantener estable el revestimiento en los taludes, además el geotextil también puede servir como protección al punzonamiento; en figura (3.1e) se muestra un doble revestimiento y un sistema de detección de escurrimientos compuesta de una geomalla entre los dos revestimientos; el primer uso de geomallas en contenedores fue aplicado en 1964 y se sigue aplicando en contenedores de líquidos peligrosos; la única variación de la figura (3.1f) es aplicar una cubierta de suelo sobre la geomembrana primaria para protegerla de varios agentes que la dañan.

3.1.2 Selección de la Geomembrana

La selección de la geomembrana, depende de varios factores como la resistencia a los agentes químicos o el tiempo de vida esperada; para depósitos de agua con fines agropecuarios, el tiempo de vida a considerar del sistema es de 20 años; en este tipo de sistemas, se ha utilizado la geomembrana no reforzada de PVC, principalmente por su bajo costo y fácil instalación comparada con otros materiales; sin embargo, este tipo de revestimiento debe ser cubierto con una capa de suelo. Cuando un sistema es utilizado para químicos líquidos se puede consultar la tabla 2.6, la cual muestra la resistencia de las geomembranas contra los agentes químicos; cuando se tiene una combinación de dos o más agentes químicos, se toma el más agresivo para la selección del material.

FIGURA 3.1 Diferentes tipos de revestimientos para sistemas de contención.



3.2 Cubiertas para estanques

Las cubiertas de geomembranas son usadas sobre superficies líquidas en estanques contenedores; el tipo de cubiertas existentes son de tipo flotante, sujetadas y suspendidas.

Existen varias razones para cubrir los tanques, entre las que podemos mencionar: por pérdidas debido a la evaporación, protección de la contaminación o algún tipo de sabotaje, entre otros; para este tipo de aplicación podemos escoger cualquier geomembrana de la tabla 2.1; sin embargo, las geomembranas resistentes a la luz ultravioleta tienen mejor desempeño para esta aplicación; cuando se tienen pequeños estanques, las cubiertas pueden ser sujetadas, pero si el área por cubrir es grande, se tiene que usar cubiertas del tipo flotante u otra opción como el encapsulado completo.

3.2.1 Cubiertas fijas

Las cubiertas fijas son usadas principalmente en tanques de área pequeña, donde las geomembranas son sujetadas en las orillas de los tanques, estos sistemas de amarre deben tener un sistema de seguridad, ya que son sometidas a fuerzas de tensión de gran magnitud, debido a que en ocasiones el nivel del agua dentro del tanque está muy por debajo del punto más bajo de la cubierta y se crea un pandeo en el centro del tanque que puede propiciar el desgarro del sistema sujetador.

3.2.2 Encapsulado

Existen sistemas encapsulados que son comparados con super-bolsas las cuales son de una medida estándar con capacidad de 3.8 millones de litros (sólo la bolsa pesa 6 ton), aunque pueden ser fabricados algunos tamaños especiales, la manufactura completa es realizada en la fábrica y llevada al lugar, donde puede ser llenada del líquido.

3.3.3 Cubiertas flotantes

Al igual que los otros tipos de cubiertas, éstas deben ser resistentes a la degradación ocasionada por la luz ultravioleta; generalmente se ha utilizado para estos casos geomembranas de CSPE-R y HDPE por sus buenas propiedades mecánicas, aunque ha dado buen resultado usar las geomembranas de EPDM en tanques con diámetro de 15 m, la necesidad de cubrir sustancias se presenta en el tratamiento de aguas residuales; para incrementar la eficiencia del tratamiento anaerobio se utilizan cubiertas de color negro que incrementa la temperatura del líquido que se encuentra debajo de ésta y con este incremento de temperatura la actividad bacteriana aumenta.

3.3 Canales

En muchas ocasiones el agua se focaliza a gran distancia de donde la necesitamos, situación que crea la necesidad de realizar sistemas que puedan transportar el vital líquido. Los primeros datos registrados de la realización de acueductos que transportaba el agua se les atribuye a los romanos. Un elemento que influye en la conducción del líquido es el factor económico, ya que el suministro debe realizarse sin pérdidas o escurrimientos durante su trayecto. Teniendo esto en mente, los ingenieros han revestido los canales por los múltiples métodos, con el fin de evitar pérdidas; esto incluye revestimientos hechos de arcilla compactada, bloques de concreto y geomembranas entre otros, estos últimos han tenido un gran impacto como revestimiento en estos sistemas.

En consecuencia a esta necesidad, la mayoría de los países han creado comités y agencias específicas que estudian este tipo de revestimientos, quienes han llegado a trabajar en colaboración internacional para ofrecer una mejor solución a este tema.

3.3.1 Selección del material

Para la conducción de agua potable o para la agricultura se pueden utilizar diferentes geomembranas de la lista 2.1; las geomembranas de PVC son las más usadas para este tipo de sistemas por su bajo costo; aunque existen muchos factores para escoger la mejor opción lo cual se basa en condiciones muy particulares como podrían ser el clima o el tipo de suelo por revestir; para seleccionar la geomembrana cuando se conducen químicos, podemos consultar la tabla 2.6; cuando se utiliza una geomembrana como revestimiento, es común poner sobre ésta una cubierta de suelo con espesor de 30 cm; esta cubierta sirve para protegerla de la luz ultravioleta y del ozono; sin embargo, cuando el agua fluye puede erosionar el suelo; la velocidad permisible del líquido puede variar entre 27 y 110 m/min, dependiendo del tipo de suelo usado como cubierta y de la turbulencia en el recorrido; como podemos observar, son varios factores que deben ser tomados en cuenta para el buen diseño y funcionamiento del sistema.

3.4 Tanques subterráneos

Las fugas en tanques contenedores de líquidos (los cuales en su mayoría contienen hidrocarburos) representa una seria amenaza contra el medio ambiente; en la actualidad podemos encontrar millones de tanques subterráneos y se calcula que entre 10 y 30% tienen fugas; esta cifra es de gran riesgo ya que al encontrarse un agujero de 6 mm en un tanque de gasolina de 75,000 l puede contaminar los mantos freáticos de una comunidad de hasta 100,000 personas; esta es la principal razón para instalar un revestimiento secundario en estos sistemas y una de las soluciones puede ser el uso de geosintéticos.

3.4.1 Tanques de poco volumen

Un segundo contenedor para los tanques de acero o fibra de vidrio, puede ser una geomalla alrededor del tanque cubiertos con una geomembrana; la geomalla actúa como detector de fugas, mientras que la geomembrana como revestimiento secundario.

Ambos materiales deben ser resistentes a los agentes químicos y principalmente a los hidrocarburos; la geomembrana más usada para este trabajo es la de HDPE.

3.4.2 Tanques de gran volumen

Cuando se tiene un conjunto de tanques, es mejor impermeabilizar el área donde serán colocados que revestir cada tanque; las orillas de la excavación son revestidas por un compuesto geotextil-geomembrana-geotextil y la detección de las fugas es hecha por un sistema de drenaje; en la mayoría de los casos se utilizan geomembranas del tipo EIA-R para estos sistemas.

3.4 Tanques subterráneos

Las fugas en tanques contenedores de líquidos (los cuales en su mayoría contienen hidrocarburos) representa una seria amenaza contra el medio ambiente; en la actualidad podemos encontrar millones de tanques subterráneos y se calcula que entre 10 y 30% tienen fugas; esta cifra es de gran riesgo ya que al encontrarse un agujero de 6 mm en un tanque de gasolina de 75,000 l puede contaminar los mantos freáticos de una comunidad de hasta 100,000 personas; esta es la principal razón para instalar un revestimiento secundario en estos sistemas y una de las soluciones puede ser el uso de geosintéticos.

3.4.1 Tanques de poco volumen

Un segundo contenedor para los tanques de acero o fibra de vidrio, puede ser una geomalla alrededor del tanque cubiertos con una geomembrana; la geomalla actúa como detector de fugas, mientras que la geomembrana como revestimiento secundario.

Ambos materiales deben ser resistentes a los agentes químicos y principalmente a los hidrocarburos; la geomembrana más usada para este trabajo es la de HDPE.

3.4.2 Tanques de gran volumen

Cuando se tiene un conjunto de tanques, es mejor impermeabilizar el área donde serán colocados que revestir cada tanque; las orillas de la excavación son revestidas por un compuesto geotextil-geomembrana-geotextil y la detección de las fugas es hecha por un sistema de drenaje; en la mayoría de los casos se utilizan geomembranas del tipo EIA-R para estos sistemas.

3.4.3 Cisternas

Los grandes depósitos de hidrocarburos son contenedores de alrededor de 10 M de litros; en esta clase de depósitos se necesita crear todo un sistema de protección; aunque estos tanques están clasificados como subterráneos, se localizan en la superficie; el sistema es igual a los mostrados en la figura 3.1, con la variante de que se colocan tanques de concreto o acero; el sistema de revestimiento es igual al de la figura previamente mencionada .

Las geomembranas más usadas para estos usos son las de HDPE y EIA-R; sin embargo, las de arcilla (GCL) han tenido una gran aceptación por su gran eficiencia como barreras impermeables.

3.5 Aplicaciones geotécnicas de las geomembranas

Recientemente las geomembranas han sido utilizadas en formas innovadoras en estructuras de ingeniería geotécnica como presas y túneles, entre otros.

3.5.1 Presas de tierra

Cuando se necesitan materiales de baja permeabilidad, las geomembranas pueden ofrecer esta propiedad, la cual es necesaria en las presas de tierra, donde el corazón es hecho de arcilla compactada; el uso de nuevos materiales han solucionado ciertos problemas como los de no encontrar cerca del lugar los bancos de materiales requeridos para la construcción; en ocasiones la geomembrana es colocada en el talud aguas arriba de la cortina, protegida por una capa de rocas; entre estas dos capas se coloca un geotextil no tejido, el cual actúa como protección para la geomembrana contra el punzonamiento ocasionado por el enrocamiento; la selección de la membrana depende de varios factores, que pueden ser su resistencia a los químicos, sus propiedades mecánicas y las de durabilidad.

3.5.2 Presas de concreto

Algunas presas de concreto muestran o tienen deterioros debido a su tiempo de vida; esto ocasiona filtraciones por fracturas en la estructura; estas fracturas deben ser reparadas inmediatamente.

Una presa de 37 m de altura fue reparada con revestimiento de PVC de 2 mm de espesor y deformación unitaria máxima de 300%, sujeta mediante ganchos de acero clavados previamente en la cara de concreto, las presas pueden repararse fácilmente por este método que usa geomembranas.

3.5.3 Túneles

La protección contra el flujo de agua en túneles ha sido realizada por geomembranas, particularmente cuando se realiza el método de túneles austriaco (NATM), el túnel es excavado e inmediatamente se aplica una cubierta de concreto lanzado para evitar algún movimiento, después se coloca un geotextil no tejido junto con un sistema de drenaje en los extremos inferiores del túnel; después es colocada una geomembrana y por último una capa de cemento.

3.6 Depósitos de desechos sólidos

La cantidad de desechos sólidos generada por el hombre ha llegado a cantidades impresionantes, en la tabla 3.1 se muestra el volumen de desperdicios, según el tipo y el método de disposición; se estima que la disposición de desechos para el año 2000 será de 510 M de toneladas y el costo de disposición en 43 billones de dólares por año, estos datos corresponden a los Estados Unidos, ya que no es fácil obtener datos de México por depender de varios intereses; tomamos estos datos para darnos una idea de la magnitud del problema, que representa la disposición de los desperdicios sólidos.

En el sistema se crea un contaminante por la lluvia o la propia humedad de los desechos en los depósitos, interactuando con los contenidos de los desperdicios, forman un líquido llamado lixiviado, este líquido se desplaza hasta la parte más baja del sistema y llega a contaminar a los mantos freáticos si no se coloca una barrera impermeable que evite la filtración del líquido; sin importar la cantidad ya que puede ser más peligroso la calidad o el grado de contaminación del lixiviado. Por esta razón un depósito de desechos sólidos incluye los siguientes componentes: un control del flujo de lixiviados para evitar que lleguen a las aguas subterráneas, el uso de un revestimiento en la parte inferior y los costados del depósito de desechos sólidos.

Los tipos de revestimientos usados para la contención de lixiviados son diversos, pero el material de revestimiento predominante ha sido la arcilla compactada, ya que ha logrado tener un buen comportamiento hidráulico con valores de permeabilidad desde 0.5×10^{-7} hasta 0.5×10^{-8} cm/s; sin embargo, éstas han sido sustituidas por revestimientos de geomembranas, principalmente por las siguientes razones:

- Las cubiertas de arcillas deben tener un espesor de 0.6 a 1.8 m lo cual es considerado un espacio que podría ser ocupado por basura.

Capítulo 3

- **Los revestimientos de arcillas han sido propensos a reacciones químicas y subsecuentemente a filtraciones cuando se presentan en los lixiviados altas concentraciones de solventes orgánicos como el metanol o el ácido acético.**

Los desechos industriales son los de mayor volumen seguidos por los municipales; sin embargo, los desechos peligrosos y radioactivos son de menor volumen pero si los de peor calidad contaminante; por esta razón, la EPA de los E.U.A. ha dividido los materiales peligroso de los no peligrosos y, dependiendo de la categoría que se encuentren los desechos, se procede a determinar las características del depósito al igual que las normas aplicables.

Para desperdicios peligrosos se debe tener dos o más revestimientos con un sistema colector de lixiviados y el sistema colector debe ser químicamente resistente, también debe soportar la carga que se coloca arriba del revestimiento y cumplir con los siguientes requisitos:

- **El sistema colector y la detección de escurrimientos debe constar de un revestimiento granular drenable de 30 cm, químicamente resistente y con permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s o un material sintético drenable equivalente al suelo.**
- **El mínimo de la pendiente en la parte inferior del sistema debe ser del 2%**
- **El sistema colector debe tener un filtro granular o equivalente de 30 cm arriba del revestimiento de drenaje y colector de lixiviados.**
- **Ambos sistemas, cuando sean de suelos, deben tener un sistema de drenaje con tubos, suficientemente resistentes para soportar las condiciones de servicio.**

Cuando tenemos desperdicios no peligrosos, los puntos más importantes son:

- **El sistema colector de lixiviados debe ser colocado arriba del revestimiento de geomembrana**
- **El revestimiento puede ser de un componente simple, sin sistema detector de lixiviados.**

Capítulo 3

TABLA 3.1 Volumen y costos en el mercado de desperdicios en E.U.A. (Koerner 1994)

Tipo de desperdicio	Volumen de desperdicios en millones de toneladas.			
	1977	1988	1993	2000
Metales pesados	51	114	149	198
Químicos orgánicos	42	100	132	180
Derivados del petróleo	16	33	44	60
Químicos inorgánicos	17	35	43	55
Otros desechos peligrosos	5	9	13	19
Por método de disposición				
Depósitos	12	200	225	165
Tratamiento/estabilización	2	13	50	150
Incineración	neg	15	35	95
Recursos recobrados	2	12	30	75
Inyección de mantos profundos	5	14	15	10
Disposiciones ilegales	110	35	20	5
Otros métodos	neg	2	5	10
Total	131	291	380	510
Productos y servicios en unidades de millones de dólares				
Productos	1977	1988	1993	2000
Tratamientos químicos	40	520	2550	900
Equipo de incineración	40	1600	4000	8500
Equipo procesador	10	340	1020	2700
Instrumentos analíticos	25	390	700	1100
Otros productos	5	650	1030	1700
Subtotal	\$120	\$3,500	\$9,300	\$23,000
Servicios				
Transportación	185	2560	3770	4700
Consultoría ingenieril	5	700	1400	3500
Limpieza	neg	645	1290	3400
Servicios de incineración	10	370	920	2500
Pruebas analíticas	35	610	1070	2300
Disposición en depósitos	15	805	1370	2000
Otros servicios	135	710	1080	1600
Subtotal	385	6200	10900	20000
Total	\$505	\$9,700	\$20,200	\$43,000

Capítulo 3

- El revestimiento debe ser una geomembrana colocada sobre el revestimiento de arcilla compactada.
- El revestimiento de arcilla compactada debe tener un espesor de 60 cm y permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s o menor.
- La geomembrana debe ser > de 0.75 mm de espesor .

Las geomallas pueden ser usadas para remplazar los sistemas de drenaje que son hechos de suelo, los geotextiles remplazar los filtros de suelos y las geomembranas de bentonita remplazar los revestimientos de arcilla compactada.

3.6.1 Secciones típicas

Un elemento crítico en el funcionamiento de un depósito de desechos sólidos es el revestimiento o barrera impermeable para evitar el flujo de los lixiviados; estas barreras impermeables pueden realizarse con geomembranas, revestimientos de arcilla compactada (CCL) y geomembranas de bentonita (GCL); en los depósitos de desechos sólidos el sistema colector de lixiviados debe estar integrado dentro del sistema principal y en caso de contar con un doble revestimiento, deberá tener un sistema detector de pérdidas; el sistema colector se localiza arriba del revestimiento primario; la única forma de registrar una fuga es a través del revestimiento cuando el lixiviado escapa y se toman pruebas de las descargas para detectar alguna fuga en el sistema; en las siguientes figuras se muestran las génesis de los revestimientos más usados: en la figura (3.2a) es la típica sección en un sistema a principios de los años ochenta, cuando no había normas sobre el espesor del revestimiento de arcilla o su permeabilidad; en la figura (3.2b) se observa que se comenzó a emplear revestimientos de geomembrana y en la fig. (3.2c) se colocaron revestimientos para drenar los lixiviados, ubicados en medio de dos geomembranas y arriba de la geomembrana primaria se coloca una capa de suelo granular que actúa como filtro, este material usado como drenaje es llamada sistema detector de fugas.

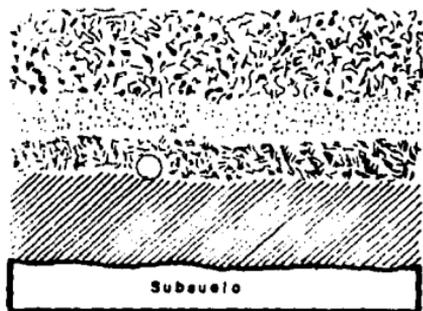
Capítulo 3

Las geomallas fueron usadas en sustitución de los otros materiales como detectores de fugas (fig. 3.2e), esta estrategia fue muy buena para el revestimiento secundario y se propuso usarla para el revestimiento primario (fig. 3.2f); sin embargo, la capa de arcilla compactada, ubicada arriba de la geomalla detectora de fugas era difícil de colocar; las geomembranas de bentonita (GCL) fueron la solución a estos problemas como el componente bajo el revestimiento primario (fig. 3.2g); finalmente las geomallas para la colección de lixiviados arriba del revestimiento primario son usadas con cierta facilidad, particularmente cuando se realizan en los taludes (fig. 3.2h); los geosintéticos han reemplazado los suelos en este tipo de sistemas, excepto el componente inferior del revestimiento secundario, en esta última parte del revestimiento, la arcilla compactada es colocada directamente sobre el suelo.

3.6.2 Selección del material

Quando se presentan fugas de lixiviados en los sistemas, afecta a la geomembrana y produce su degradación prematura, haciendo más crítica la selección del material que cualquier otra parte del sistema, se han tratado de realizar pruebas para la selección del material por parte de la EPA de los E.U.A; la prueba bajo el método 9090 o la D5322 de la ASTM con lixiviados sintético realiza un proceso de incubación con una serie de pruebas mecánicas y físicas con una variación del tiempo para determinar si las propiedades de la geomembrana han cambiado durante el periodo de la prueba; el lixiviado utilizado es de gran trascendencia, ya que en el peor de los casos cuando un lixiviado es seleccionado, este propiciará al resultado según sus contenidos; un ejemplo es, si escogemos un lixiviado que contenga solventes orgánicos y algunos otros agentes químicos, el resultado de la prueba será una geomembrana de polietileno; cuando se selecciona el lixiviado más agresivo, normalmente la selección será usar geomembrana de HDPE.

Figura 3.2 Génesis de cortes de sección de revestimientos



Basura

Filtro de suelo

Grava

(a)

Arcilla

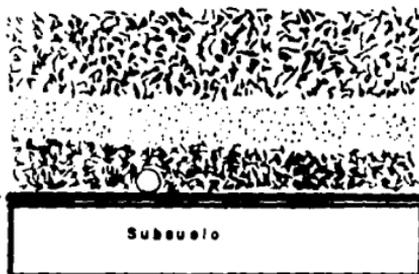
(b)

Basura

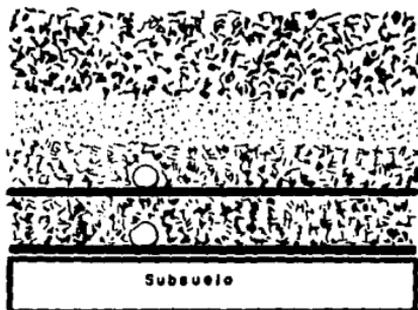
Filtro de suelo

Grava

Geomembrana



Subsuelo



Basura

Filtro de suelo

Grava

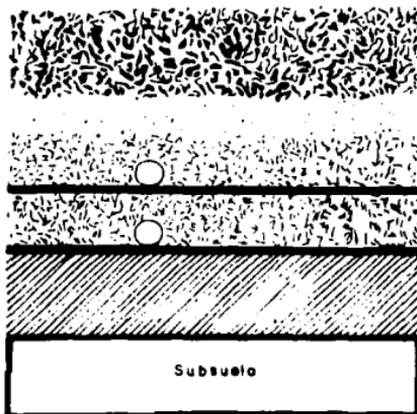
Geomembrana primaria

Grava

Geomembrana secundaria

Subsuelo

(c)



Basura

Filtro de suelo

Grava

Geomembrana primaria

(d)

Grava

Geomembrana secundaria

Arcilla

Subsuelo

(e)

Basura

Filtro de suelo

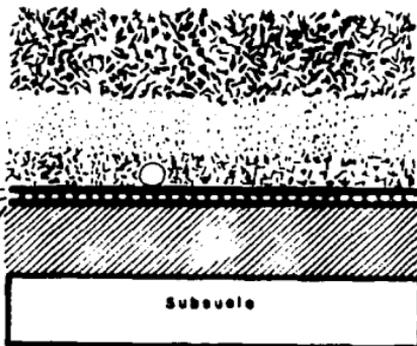
Grava

Geomembrana primaria

Geomalla

Geomembrana secundaria

Arcilla



Subsuelo

Basura

Filtro de suelo

(f)

Grava

Geomembrana primaria

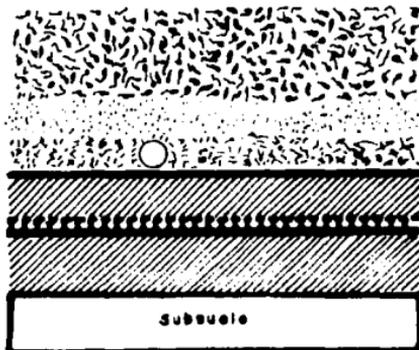
Arcilla

Geotextil

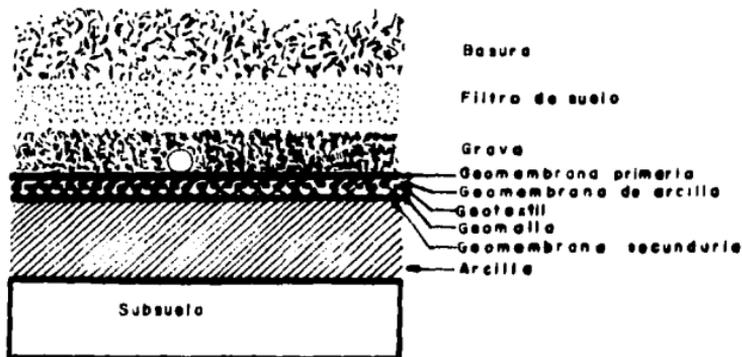
Geomalla

Geomembrana secundaria

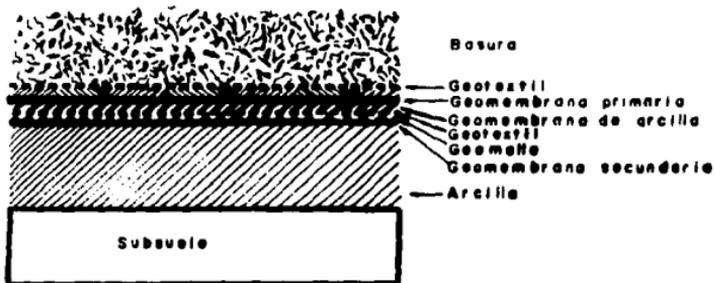
Arcilla



Subsuelo



(g)



(h)

3.7 Cubiertas

Para minimizar o eliminar la generación de lixiviados después que un depósito de desechos sólidos ha sido llenado, se encapsula el sistema con una cubierta de geomembrana; cuando el sistema está completamente lleno se procede a colocar una cubierta, previamente a esto se debe estabilizar el relleno, si no se sigue este paso, el desperdicio viscoso trabajará gradualmente y levantará el revestimiento hasta emerger a la superficie.

La EPA de E.U.A. sugiere colocar las siguientes elementos para obtener buenos resultados en el comportamiento de un sistema cubierto con una geomembrana.

- Se colocará sobre el desperdicio una capa de arcilla compactada con permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s y un espesor mínimo de 60 cm
- La geomembrana colocada arriba de la arcilla debe tener un espesor mínimo de 0.75 mm
- Debe ser colocado un revestimiento drenable con una permeabilidad de 1×10^{-2} cm/s arriba de la geomembrana.
- Se debe colocar una cubierta de suelo tipo agrícola en la parte superior de los otros revestimientos con espesor de 60 cm

Las cubiertas más comunes son las geomembranas de PVC y VLDPE para rellenos no peligrosos. Sin embargo, todos los sistemas de cubiertas deben de contar con los siguientes componentes:

- Capa colectora de gas
- Capa de barrera impermeable
- Capa de drenaje
- Capa protectora del sistema
- Capa superficial

3.7 Cubiertas

Para minimizar o eliminar la generación de lixiviados después que un depósito de desechos sólidos ha sido llenado, se encapsula el sistema con una cubierta de geomembrana; cuando el sistema está completamente lleno se procede a colocar una cubierta, previamente a esto se debe estabilizar el relleno, si no se sigue este paso, el desperdicio viscoso trabajará gradualmente y levantará el revestimiento hasta emerger a la superficie.

La EPA de E.U.A. sugiere colocar las siguientes elementos para obtener buenos resultados en el comportamiento de un sistema cubierto con una geomembrana.

- Se colocará sobre el desperdicio una capa de arcilla compactada con permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s y un espesor mínimo de 60 cm
- La geomembrana colocada arriba de la arcilla debe tener un espesor mínimo de 0.75 mm
- Debe ser colocado un revestimiento drenable con una permeabilidad de 1×10^{-2} cm/s arriba de la geomembrana.
- Se debe colocar una cubierta de suelo tipo agrícola en la parte superior de los otros revestimientos con espesor de 60 cm

Las cubiertas más comunes son las geomembranas de PVC y VLDPE para rellenos no peligrosos.

Sin embargo, todos los sistemas de cubiertas deben de contar con los siguientes componentes:

- Capa colectora de gas
- Capa de barrera impermeable
- Capa de drenaje
- Capa protectora del sistema
- Capa superficial

3.7.1 Barrera Impermeable

En el diseño de barreras impermeables podemos considerar varias opciones como son usar un revestimiento sencillo de arcilla compactada, una simple geomembrana, un simple geotéctico de bentonita y combinaciones de dos y hasta tres componentes de estos mismos materiales.

Existen varios factores que afectan la selección de una barrera, los cuales pueden ser el clima, la vulnerabilidad al efecto de la erosión o la resistencia al punzonamiento, al igual que la cantidad de percolación de agua a través del sistema de la cubierta, otro factor importante es el costo, ya que al usar más de una capa se incrementa en forma considerable y uno de los objetivos al usar revestimientos sintéticos es minimizar costos.

4 Instalación y control de calidad

4.1 Selección de la geomembrana

Una vez que se ha definido la función del sistema, se realiza la selección de la membrana que será usada, lo cual implica varios criterios, entre los cuales podemos mencionar los que son enlistados según el orden de importancia; esta lista solamente tiene valor indicativo y puede variar de una obra a otra:

- Alta resistencia a la tensión, flexibilidad y elongación sin falla.
- Resistencia a la abrasión, al punzonamiento y a los efectos de agua de deshecho.
- Buena resistencia al intemperismo.
- Inmunidad al ataque de bacterias y hongos.
- Densidad > 1.0
- Color negro.
- Espesor mínimo de 0.4 mm
- Composición uniforme y ausencia de defectos físicos.
- Resistencia a variaciones de temperaturas y condiciones ambientales .
- Fácil reparación.
- Economía

Un factor de suma importancia es saber las propiedades de los materiales sintéticos que serán usados, las cuales dependen del tipo del material y la marca; otro factor es la compatibilidad entre

el tipo de revestimiento y sustancia almacenada; para este fin podemos consultar la tabla 2.6 donde se reporta la resistencia de la membrana a ciertos agentes que pueden dañar la integridad del sistema. En la lista 4.1 se mencionan algunas propiedades de los materiales de uso más común para revestimientos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

CLORURO DE POLIVINILO (PVC)

Al alimentar el reactor con un monómero de cloruro de vinilo, el producto resultante es la resina de cloruro de polivinilo (PVC), el cual es un material blanco parecido al azúcar granulada o pulverizada, dependiendo del polímero o del procedimiento de fabricación. El PVC se produce a partir de un monómero que contiene dos átomos de carbono y uno de cloro. La resina de cloruro de polivinilo fue sintetizada por vez primera en Alemania hace más de 60 años; era un material duro y semiofaco; sin embargo, a principios de la década de los años treinta se descubrió una sustancia química que podía convertir la resina en un material flexible útil. Se descubrió que se podía alterar la resina al mezclarla con un plastificante o agente reblandecedor, si después de la mezcla se aplicaba calor y presión. El producto resultante demostró ser una barrera excelente contra la corrosión y sus primeras aplicaciones fueron para este uso; la alteración producía un material muy útil que poseía gran flexibilidad y excelente resistencia a la abrasión; no lo afectaba el ozono, contrariamente al hule y era resistente a un gran tipo de soluciones químicas comunes. Otras sustancias se agregan al compuesto plástico, tales como pigmentos para dar color, estabilizadores ligeros para inhibir el efecto de los rayos ultravioleta del sol, estabilizadores al calor y diluyentes.

Las membranas de PVC se fabrican en espesores desde 0.25 hasta 2.00 mm. Las membranas de PVC tienden a rigidizarse con el tiempo debido principalmente a que van perdiendo paulatinamente el plastificante, ya sea por extracción de agua, volatilización térmica, o por ambos mecanismos. Estos cambios van acompañados de un aumento en la resistencia a la tensión y en la dureza y por tanto se vuelven más frágiles; esto significa que el PVC presenta un comportamiento muy desfavorable al envejecimiento y no debe ser expuesto directamente a la atmósfera, por lo tanto, es necesario proteger la mayoría de los productos con un relleno de 15 a 30 cm de espesor mínimo.

POLIETILENOS (PE, VLDPE, LDPE, MDPE, HDPE)

Al alimentar el reactor con el monómero de etileno se produce una resina de polietileno (PE); el mezclado del polietileno es un proceso radicalmente diferente al empleado en la industria del vinilo (PVC). El polietileno tiene una característica única de rigidez que, dentro de márgenes estrechos se puede modificar, como el caso del polietileno de baja densidad (0.91 a 0.925 g/cm³) el cual es un material muy flexible y de inferiores propiedades físicas y mecánicas que los de mayor densidad; el material es casi resistente a todo, de hecho es tan resistente que los adhesivos líquidos no surten efecto en el material. El polietileno de muy baja densidad (VLDPE), donde sus moléculas han sido mejoradas mecánicamente para que presente un mejor comportamiento. El polietileno de densidad media (0.926 a 0.940 g/cm³) posee mejores propiedades de resistencia a la tensión, desgarre y rigidez que el de baja densidad y el polietileno de alta densidad (> 0.941 g/cm³) es un material denso y altamente ordenado. Cuando el polietileno no es orientado, tiene una excelente resistencia química a los solventes, excepción hecha de los ácidos (nitrógeno y sulfúrico); puede ser afectado por los alcoholes, hidrocarburos líquidos, ésteres orgánicos, jabones metálicos y otros productos; posee baja permeabilidad a los líquidos, gases y vapores.

POLIPROPILENO (PP)

El polipropileno es un miembro de la familia de las poliolefinas, como el polietileno de alta densidad; el polipropileno es bajo en cristalinidad, lo cual le da mejores propiedades físicas y químicas que el polietileno; es una membrana termoplástica muy flexible, resistente a bases y ácidos. El polipropileno es un polímero altamente estable, comenzando con su estructura molecular básica la cual está diseñada para sobrevivir bajo duras condiciones; las geomembranas de polipropileno no contienen plastificantes; éstas serán flexibles aún después de ser expuestas a las condiciones climatológicas o los rayos ultravioletas; sin embargo, son susceptibles al ataque químico en mayor grado que el polietileno.

Tabla 4.1 Propiedades de los materiales utilizados en geomembranas (Murillo 1990)

Propiedad	LDPE	HDPE	PVC	CPE	PP	NR	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	0.92 a 1.25	1.4 a 1.5	1.15 a 1.21
Resistencia a la tensión kg / cm ²	91 a 176	169 a 137	176 a 246	127 mínimo	281 a 2250	70 a 281	70 a 141	91 a 105
Deformación a la falla %	200 a 800	10 a 650	250 a 350	375 a 575	40 a 400	300 mínimo	300 a 500	300 mínimo
Dureza Shore A	N.D.	N.D.	65 a 75	65 a 75		45 a 80	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	-46 a 163	-43 a 93	-59 a 149
Resistencia a ácidos	P a B	B	B a E	B a E	B a E	B	B	B a E
Resistencia a bases	B a E	B a E	B a E	B a E	B a E	B	B a E	B a E
Resistencia a solventes	P A B	P a B	B	P	P	B a E	B	B a E
• oxigenados								
Resistencia a solventes	R a B	R a B	B	P	B	P	R	P
• aromáticos y halogenados								
Resistencia a solventes	R a B	R a B	B	B	B	P	R	P
• alifáticos (petróleo)								
Permeabilidad al vapor de agua E-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
Resistencia al intemperismo	P (s/p)	P (s/p)	P a R	E	P (s/p)	B	E	E
Tiempo de agrietamiento h	900	300	no ocurre a 3500	sin efecto a 4000	100	sin efecto > 2500	sin efecto > 1000	sin efecto
Tiempo de desintegración h	sin efecto a 2500	600	300	sin efecto a 4000	600	sin efecto > 2500	sin efecto > 1000	sin efecto
Tiempo de decoloración h	300	300	100	sin efecto a 4000	900	sin efecto > 2500	sin efecto > 1000	sin efecto
Esperanza de vida años						> 20	> 20	> 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.

POLIETILENO CLORADO (CPE)

El polietileno clorado resulta de la cloración de polietileno de alta densidad, aplicando entre 25 y 40% de cloro y con 0 a 25% de estructuras cristalinas. Se obtiene así un material análogo en su composición al PVC, pero con mejor resistencia a los agentes climáticos, ya que tiene buena resistencia al ozono; sin embargo, no es recomendable su uso en contacto con líquidos aromáticos. El producto se presta además a todas las técnicas de junteo usuales; se fabrica en espesores desde 0.25 hasta 2.25 mm.

HULE BUTILO (IR)

El hule butilo proviene de una reacción de copolimerización; el monómero básico es el isobutileno, el cual se polimeriza en presencia de pequeñas cantidades de isopreno; sus principales propiedades son la baja permeabilidad a los gases y vapor de agua, estabilidad térmica, resistencia al ozono, al intemperismo, al ataque químico y a la humedad, así como a grasas y aceites vegetales y animales. También tiene buena resistencia a los ácidos minerales y alta tolerancia a temperaturas extremas. La mayoría de las membranas son unidas en fábrica por medio de vulcanización, las cuales son de gran confiabilidad, los espesores más comunes son entre 0.75 a 1.5 mm.

MONOMERO DIENO PROPILENO ETILENO (EPDM)

Forma una familia de terpolímeros de etileno, propileno y una cantidad menor de hidrocarburos de dieno no conjugados; se producen tanto en estructuras termoplástica como vulcanizada; ésta última tiene buena resistencia al intemperismo y radiación ultravioleta y cuando se formula adecuadamente, resiste a la abrasión y al desgarro. El EPDM es el único material que puede emplearse para altas temperaturas (desde 80 hasta 100°C); conserva su flexibilidad a baja temperatura; tiene buena resistencia a los ácidos diluidos, álcalis, silicatos, fosfatos y salmuera. No es recomendable en contacto con solventes derivados del petróleo, aromáticos o halogenados.

NEOPRENO (CR)

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

POLIETILENO CLOROSULFONADO (CSPE O HYPALON)

El Hypalon es una resina de polietileno clorosulfonado cuyas características de mezclado siguen patrones muy semejantes a las de PVC. Se produce al reaccionar el etileno con el cloro y 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; las membranas de Hypalon se presentan en una gran variedad de técnicas de fabricación y pueden ser unidas bajo diferentes métodos.

ASFALTO (ASF)

Es el residuo sólido del petróleo crudo, una vez que ha eliminado los hidrocarburos volátiles. Se encuentra en forma natural (chapotote) o se obtiene como subproducto de la refinación del petróleo; corresponde a un material termoplástico de bajo peso molecular, con peso específico de 1 g/cm^3 ; se ablanda entre 50 y 100°C ; se emplea para elaborar membranas asfálticas comunmente con un aditivo volátil (solvente) o con la aplicación de calor para hacerlo fluido; se le incorporan rellenos minerales inertes; es resistente a la mayoría de las soluciones industriales con concentración menor al 5% de solventes de petróleo, aceites, grasas y solventes aromáticos.

GEOCOMPUESTOS DE BENTONITA (GCL's)

Corresponden a los productos relacionados, ya que en su forma de suministro, consisten en granos de arcilla confinados entre dos textiles, que al ponerse en contacto con el agua se hidratan y expanden formando una capa de gel arcilloso de baja permeabilidad. En algunos productos, una de las caras es una geomembrana de polímero; todas las geomembranas fabricadas en Norteamérica son hechas con bentonita sódica, con masa por unidad de área de 3.2 a 6.0 kg/m^2 , donde el espesor de la arcilla varía entre 4.0 y 6.0 mm.

4.2 Instalación

4.2.1 Preparación de la superficie

El contratista del terraplén es el responsable por la preparación de éste, siguiendo las especificaciones de diseño; al igual que el ingeniero residente verificará que se cumplan las siguientes condiciones:

- La superficie por ser revestida debe ser preparada y compactada para dejarla libre de irregularidades geométricas así como de agua o aceite.
- La superficie preparada no debe contener piedras u otros materiales punzonantes que puedan dañar el revestimiento.
- No deben presentarse zonas blandas en el área por revestir.

La compañía encargada de la instalación proporcionará al dueño/agente un reporte de las áreas terminadas en cada día de trabajo (bitácora), la cual será entregada después de las actividades de instalación; en caso de no cumplirse las condiciones antes mencionados no se procederá al despliegue de las geomembranas y en caso de haber contratiempos, el trabajo de instalación será suspendido hasta que sea atendido adecuadamente el problema.

4.2.2 La geomembrana en campo

Un panel en campo es la unidad de área de membrana, la cual es colocada en el campo; un panel completo puede ser un rollo completo o un parte de éste cortado en campo; cada panel debe ser marcado por el instalador con un número identificador, con el fin de llevar un registro del material recibido en campo (tabla 4.2) y ser sometido a las pruebas de control de calidad, las cuales son realizadas a cada panel por ser usado.

REGISTRO DE MATERIAL EN CAMPO (TABLA 4.2)

RESULTADOS DE PRUEBA EN LABORATORIO

CONTRATO : MACROCELDA P/RESIDUOS HOSPITALARIOS

UBICACION : ZONA FEDERAL EX-LAGO DE TEXCOCO

CONTRATANTE : D.D.F.D.G.S.U

RESIDENTE : _____

No DE ROLLO : No1

INVENTARIO : A 02 922 9 68

FECHA DE RECIBIDO : 20-08-93

FECHA DE INICIO : 16-08-93 **FECHA DE TERMINACION :** 20-09-93

MARCA Y FABRICANTE DEL MATERIAL : GUINDEL LINING

SYSTEMS, INC

OBSERVACIONES: EL RESULTADO DE LABORATORIO ES EL VALOR PROMEDIO DE 4 MUESTRAS

TEST DE PRUEBA	LABORATORIO PRECAP S.M.D.	LABORATORIO PRECAP S.L.	ESPECIFICACION DEL FABRICANTE	VALORES DE TOLERANCIA	RESULTADO (+) (-)	OBSERVACIONES
RESISTENCIA A LA FLUENCIA	41.6 kg/cm ²	133 kg/cm ²	106 lb/pulg ²	95 lb/pulg ²	(+)	PRUEBA ASTM D-683
ELONGACION A LA FLUENCIA	40.7 %	40.7 %	15 %	13 %	(+)	PRUEBA ASTM D-683
CARGA A LA RUPTURA	72.0 kg/cm ²	229 lb/pulg ²	207 lb/pulg ²	160 lb/pulg ²	(+)	PRUEBA ASTM D-683
ELONGACION A LA RUPTURA	866.7 %	886.7 %	851 %	700 %	(+)	PRUEBA ASTM D-683

4.2.3 Colocación en campo

La colocación del panel en campo debe tomar en cuenta los siguientes aspectos para un buen proceso de instalación: sitios de drenaje, dirección de vientos dominantes, acceso al sitio y sobre todo, tener un plan estratégico durante la colocación; inmediatamente que se han realizado los despliegues, el encargado de obra y el inspector designado o el técnico de aseguramiento de calidad (QA) inspeccionarán visualmente el revestimiento y serán marcadas las secciones de los paneles que presenten algún daño o defecto.

4.2.4 Condiciones climatológicas

Los paneles de geomembranas no procederán a desplegarse cuando se presenten condiciones climatológicas que puedan dañar la integridad del revestimiento, al igual que si las condiciones de la superficie del terreno han sido deterioradas por las mismas condiciones adversas. El viento es el principal enemigo del proceso de instalación, por lo que se deben tener ciertas precauciones como el uso de pesos muertos para prevenir que membrana los ventarrones puedan llegar a levantar la durante el proceso de colocación.

4.2.5 Despliegue o extendido

El encargado de obra procederá con el paso de despliegue previniendo que:

- Cualquier equipo usado no debe causar daño alguno a la superficie.
- Las condiciones de la superficie no han sido deterioradas.
- La superficie debe estar libre de rocas, escombros, baches etcétera.
- El personal de instalación no debe fumar o vestir zapatos que puedan dañar el revestimiento, al igual que realizar otras actividades que no sean concernientes a la instalación.
- Deberán ser presentados adecuados tipos de lastre para colocarlos en las orillas de los paneles, con el fin de evitar el levantamiento de las membranas por el viento.

4.3 Uniones de las geomembranas

Uno de los principales aspectos a cuidar en la instalación de un revestimiento son las juntas, las cuales dan las propiedades de crear una barrera impermeable; para esto debe haber un control de calidad, mediante un cuadro descriptivo de las líneas de soldadura (tabla 4.3), en un croquis; también se deben marcar y numerar los tipos de soldaduras que se emplearán, según el desplegado de los paneles (figura 4.1). El mecanismo fundamental de las juntas de las geomembranas es reorganizar la estructura del polímero de las dos superficies opuestas para ser unidas en una forma controlada, después de la aplicación de presión y pasar cierto tiempo, el resultado será la unión de dos membranas. Este resultado de reorganización es mediante energía, la cual es originada por procesos químicos o térmicos; este proceso puede adicionar polímero extra en las partes de las juntas. Una junta ideal entre dos geomembranas, debe resultar como si fuera un solo lienzo para el esfuerzo a la tensión; sin embargo, esto no se obtiene en todos los casos debido a la concentración del esfuerzo, resultado de la desigual geometría de la junta. Muchas técnicas de sellado pueden resultar con menor esfuerzo relativo a la tensión del que la propia geomembrana puede soportar; las características del área sellada son función del tipo de geomembrana y la técnica de sellado usada. Para el grupo de geomembranas termoplásticas, existen principalmente dos procesos de uniones las cuales son: proceso térmico y proceso con solventes; algunos tipos uniones son mencionados en la tabla 4.4

4.3.1 Proceso térmico

SOLDADURA POR EXTRUSION

Esta soldadura es únicamente para geomembranas de HDPE y VLDPE; una cinta de polímero fundida es extruida sobre el lado superior o en medio de las dos superficies por ser unidas; el

TABLA 4.4 Métodos fundamentales de uniones en geomembranas (Koerner 1994)

Proceso térmico	Proceso con solventes
Extrusión	Solventes
Filete	Solventes para fusión
Plano	Solventes para fusión integral
Fusión	Adhesivos
Cuña caliente	Adhesivo solvente
Aire caliente	Adhesivo de contacto

material derretido hace que las superficies de los lienzos se calienten y luego se funde; después de esto se enfría y se sellan las dos membranas por sí mismas. La técnica es llamada extrusión filete, cuando el material es colocado sobre el borde de la geomembrana la cual está colocada sobre otra geomembrana y es llamada extrusión plana cuando el polímero es colocado entre los dos lienzos. Las juntas por extrusión plana, es el único método de colocar parches de polietileno, para uso de áreas de difícil acceso como las partes bajas y alrededor de los tubos y juntas de longitud extremadamente pequeña. El grado de temperatura, la humedad, el clima y la velocidad en que se aplica la soldadura juega un importante papel para obtener un buen resultado, ya que si se aplica demasiado calor se ocasionan arrugas y si no se aplica suficiente se obtiene una junta de pobre resistencia a la tensión.

SOLDADURA POR TERMOFUSION

Existen dos métodos de termofusión que pueden ser usados en la mayoría de las geomembranas termoplásticas; en cualquiera de ellas las superficies de las membranas son firmemente selladas. En este caso, la temperatura, presión y velocidad de la soldadura juegan un papel importante, por

que si no se tienen un buen control de estos parámetros, se pueden encontrar condiciones adversas como las mencionadas en la soldadura por extrusión. El método de cuña caliente o zapata consiste de una resistencia calentada eléctricamente con un elemento en forma de cuña, la cual viaja a través de los dos lienzos por ser unidos. Este funde las dos superficies de los lienzos, es aplicada una presión por un rodillo a los lienzos para convergir a la punta de la soldadura para formar la junta definitiva. Las unidades de una cuña caliente son automatizadas para temperatura, cantidad de presión aplicada y velocidad del recorrido. Una cuña caliente estándar, crea una simple junta con ancho uniforme, mientras una cuña caliente (doble split) forma dos juntas paralelas, con un espacio sin unir en medio de éstas. Este espacio puede ser usado para evaluar la calidad de la junta al igual que su continuidad, presurizando el espacio que no ha sido unido con aire y registrando alguna pérdida de presión, que significaría una fuga en el sistema. El método de aire caliente usa un aparato que consiste en una resistencia calentadora y controles de temperatura para soplar el aire o nitrógeno calientes, entre los dos lienzos para derretir las superficies; inmediatamente después de derretir las superficies, es aplicada una presión para formar la junta y así lograr la unión.

DIELECTRICO

Es un método que mantiene unidas las hojas con presión y se les aplica energía electromagnética en la frecuencia del radio, que hace vibrar a las moléculas, las calienta y provoca la fusión y mezcla

entre ambas superficies. Este método sólo es aplicado en planta para PVC, CPE y CSPE.

ULTRASONICO

Es un método que consiste en aplicar energía ultrasónica en frecuencia de 20 a 40 kHz para generar calor en el contacto entre las hojas para producir la fusión; con este método se puede hacer uniones en materiales como el polietileno, polipropileno y el PVC.

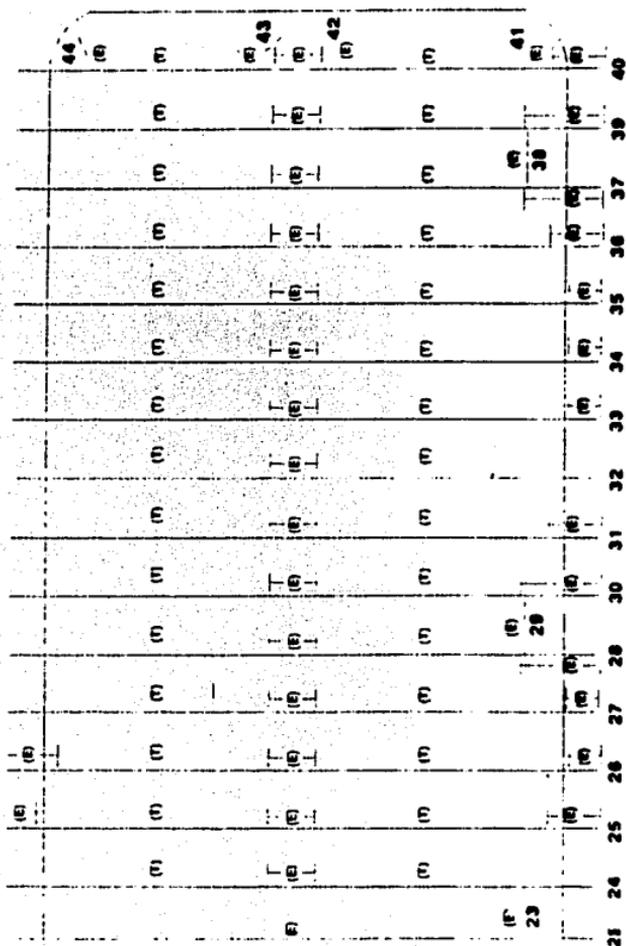
UNION DE MATERIALES ASFALTICOS

Se utilizan dos métodos básicos, uno es aplicar flama directa a las superficies para fundir el asfalto, o bien, colocar mastiques asfálticos en el interior del traslape o en el borde formando filetes.

CUADRO DESCRIPTIVO DE LAS LINEAS DE SOLDADURA (TABLA 4.3)

No DE SOLDADURA	TIPO DE SOLDADURA	DEFECTOS VISUALES	PRUEBA DESTRUCTIVA	PRUEBA NO DESTRUCTIVA	FUGAS DETECTADAS	REPARACIONES	M.L. SOLDADOS	FECHA DE SOLDADURA	OBSERVACIONES
22	EXTRUSION	0	0	CHISPA ELEC.	0	0	95.60	23-08-93	
23	EXTRUSION	0	0	CHISPA ELEC	0	0	7	23-08-93	
24	TERMOFUSION	0	1	SELLO DOBLE PRESURIZADO CHISPA ELEC.	0	0	4.40	24-08-93	1
	Y EXTRUSION	0	0		0	0	4.40		
25	TERMOFUSION	0	0	SELLO DOBLE PRESURIZADO CHISPA ELEC.	0	0	85.80	25-08-93	
	Y EXTRUSION	0	0		0	0	9.40		
26	TERMOFUSION	0	1	SELLO DOBLE PRESURIZADO CHISPA ELEC.	0	0	85.00	30-08-93	2
	Y EXTRUSION	0	0		0	0	10.20		
27	TERMOFUSION	0	1	SELLO DOBLE PRESURIZADO CHISPA ELEC.	0	0	89.00	31-08-93	3
	Y EXTRUSION	0	0		0	0	6.40		
28	TERMOFUSION	1	1	SELLO DOBLE PRESURIZADO CHISPA ELEC	0	0	86.20	31-08-93	4
	Y EXTRUSION	0	0		0	0	8.80		
29	EXTRUSION	0	0	CHISPA ELEC	1	1	7.00	02-09-93	

FIGURA 4.1 Líneas de soldadura



(T) Soldadura por termofusión.
(E) Soldadura por extrusión

4.3.2 Trabajo con solventes

SOLVENTES

En las juntas con solventes para la fusión, se usa un líquido solvente aplicado entre los dos lienzos de geomembrana por ser unidos; después de unos segundos, la superficie es suavizada y se ejerce un poco de presión para hacer completo el contacto y los lienzos queden unidos entre sí, esta técnica sólo es usada para aquellas geomembranas que pueden ser disueltas por la aplicación de algún solvente. El Methyl ethyl ketone (MEK), es usado muchas veces para este tipo de juntas, pero debe ser utilizado bajo cierto cuidado ya que si se coloca demasiado puede disolver la membrana y se logra una junta de baja calidad o puede ocasionar arrugas en las juntas. Las juntas con solvente integral son similares a las de solventes excepto que entre el 1 y 20% de la resina del polímero principal o componente, es disuelto en el solvente y después usado para hacer la junta, el propósito de adicionar la resina o componente es para incrementar la viscosidad del líquido para el trabajo en taludes y ajustar el rango de evaporación del solvente, este líquido solvente es aplicado en medio de las dos superficies opuestas por ser unidas y después de unos segundos es aplicada cierta presión para completar el contacto.

ADHESIVOS

Las juntas con adhesivos solventes usan un agente de unión disuelto en el solvente, el cual permanece después de que la junta ha sido completada y curada. El adhesivo viene a ser un elemento adicional en el sistema; los adhesivos de contacto son agentes de unión aplicados en ambas superficies; después de alcanzar el grado de adherencia propia para añadir, los dos lienzos son colocados uno sobre otro, ejerciendo cierta presión y así el adhesivo forma la junta, este último método está en desuso.

VULCANIZADO CON CALOR Y ADHESIVOS

Existen otros tipos de soldaduras como el vulcanizado con calor y adhesivos, que se aplican en planta utilizando azufre, pero cuando se utilizan adhesivos se puede realizar en campo; este método es usual para IIR y EPDM.

4.3.3 Uniones de membranas de bentonita

Las uniones de membranas de bentonita se realizan por traslapes, normalmente con ancho de 15 cm; en algunos productos se retira el textil de las caras en contacto y en otros se coloca bentonita en polvo o pasta de razón de 375 g por metro lineal de junta.

Una junta es considerada una entidad separada si ésta une dos paneles. En esquinas y sitios geométricos en forma de punta, las juntas deben ser minimizadas. Todos las uniones deberán ser orientadas paralelamente al plano de máxima pendiente (orientadas a lo largo, no al través).

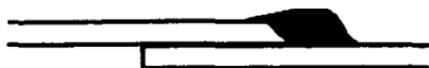
Los tipos de juntas más comúnmente usados según el material se indican en la siguiente tabla:

TABLA 4.5 Uniones en campo según el tipo de geomembrana (Koerner 1994)

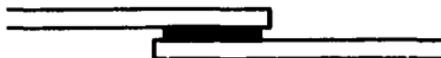
Tipo de unión	HDPE	VLDPE	PVC	CSPE	EIA-R	PP
Extrusión	A	A	N/A	N/A	N/A	A
• filete y plano						
Termofusión						
• cuña y aire caliente	A	A	A	A	A	A
Solventes para fusión						
• solvente y solvente integral	N/A	N/A	A	A	A	N/A
Adhesivos	N/A	N/A	A	A	A	N/A
• solventes y contacto						

NOTA A = aplicable
NA = no aplicable

UNION POR EXTRUSION



Tipo filete



Tipo plano

UNION POR TERMOFUSION

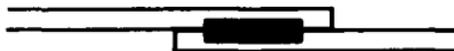


Doble cuña

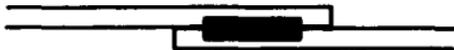


Aire caliente

UNION CON SOLVENTES

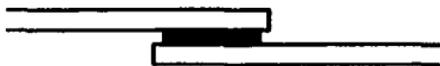


Solvente

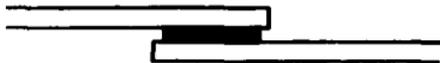


Solvente integral

UNION CON ADHESIVOS



Adhesivo solvente



Adhesivo de contacto

4.3.4 Pruebas de las juntas

Son un importante aspecto del procedimiento de uniones en campo. Esto significa que las juntas deben ser realizadas con el equipo apropiado y el personal con adecuada experiencia, ya que de la realización de este trabajo depende principalmente el éxito de una barrera impermeable. Antes de iniciar las actividades de soldadura, se efectuarán pruebas al equipo verificando su funcionamiento mecánico y la temperatura calibrada, las cuales son llamadas pruebas de inicio de operaciones del equipo y soldadura (tabla 4.6) y así, dar paso a una prueba de soldadura del material (la cual puede realizarse de 1 m) por cada equipo a ser usado. Esta prueba debe ser verificada en campo con un tensómetro, obteniendo en forma inmediata el resultado operativo de los equipos y con esto dar su autorización para efectuar las soldaduras correspondientes. Algunos otros aspectos que debe seguir el técnico soldador, para el buen resultado de las juntas son los siguientes:

- Previamente al inicio del trabajo, el área debe estar libre de humedad, polvo, grava, arena, etcétera.
- La junta será extendida por lo menos 10 cm más allá de las áreas dañadas, cuando se trate de soldadura por extrusión.
- No se permiten arrugas o bocas de pescado en las juntas.
- Las condiciones climatológicas no deben ser adversas durante el proceso de sellado.
- El personal que realiza las juntas debe ser gente entrenada y capacitada.

4.3.5 Pruebas destructivas

Después de haber realizado todas las uniones de campo se debe evaluar su comportamiento; el procedimiento obvio es el cortar una muestra y mandarla a laboratorio donde será probada en tensión hasta la falla; esta prueba también se puede realizar en campo. El procedimiento de la

PRUEBAS DE INICIO DE OPERACIONES DEL EQUIPO DE SOLDADURA (TABLA 4.6)

CONTRATO : MACROCELDA P/RESIDUOS HOSPITALARIOS

UBICACION : ZONA FEDERAL EXLAGO DE TEXCOCO

CONTRATANTE : D.D.F - D.G.S.U.

**COMPOSICION DE LA SOLDADURA : UNION SOLDADURA
CON 2 LIENZOS DE 1
1mm DE ESPESOR**

FECHA DE INICIO : 16-08-93 FECHA DE TERMINACION : 30-09-93

MARCA Y FABRICANTE DEL MATERIAL : GUNDEL LINING

SYSTEMS, INC.

OBSERVACIONES : POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

PRUEBA No	FECHA DE SOLDADURA	No DE ROLLO INVENTARIO	TECNICO SOLDADOR	EQUIPO UTILIZADO	CARGA A LA FLUENCIA	RESULTADO (+) (-)	TEMP. AMBIENTAL	TEMP. DEL EQUIPO	HORA	OBSERVACIONES
1	23-08-93	1	MODESTO	TRASLAPADORA	58.23 Kg	(+)	20.3 °C.	340 °C	8.55	
2	23-08-93	1	SIMITRIO	EXTRUSORA	53.01 Kg	(+)	20.03 °C	395 °C	9.10	

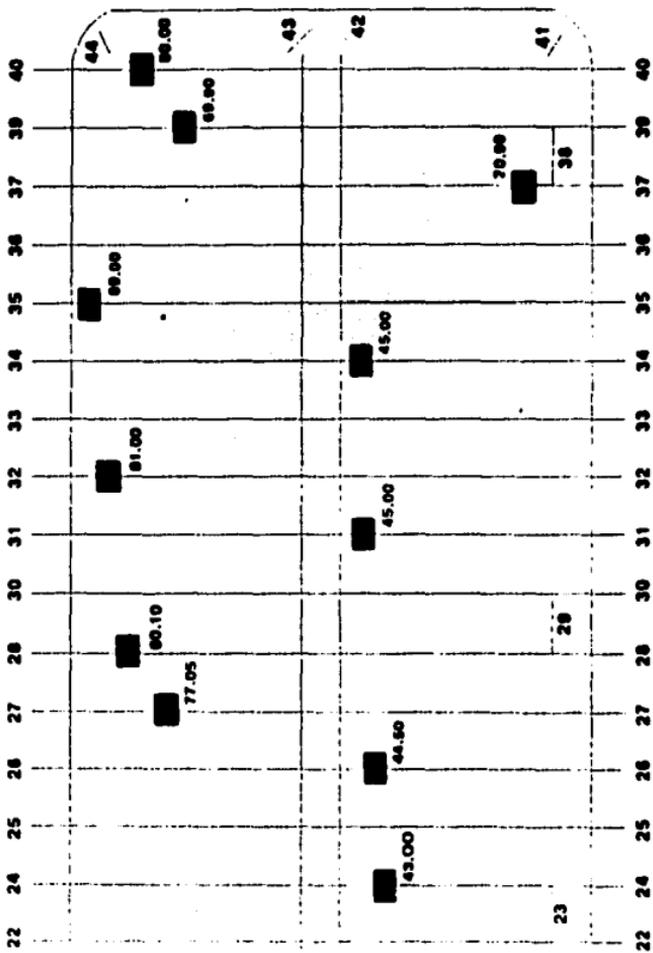
**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

prueba es parecido a las de cortante (shear) y separación (peel) las cuales serán descritas posteriormente; consiste en estirar una tira de membrana de 2.5 x 15 cm hasta su falla, al aplicarle deformación constante. El lugar y el número de pruebas a realizar es un factor importante, ya que al obtener una muestra se procederá al parchado de la sección cortada; esto significa que no conviene hacer un sinnúmero de pruebas. Una buena recomendación es el cortar 6 muestras por kilómetro de junta o una muestra cada 150 m; el lugar y el tamaño depende muchas veces del criterio del personal de aseguramiento de calidad QA o control de calidad QC, quienes son los encargados del control de calidad. Se debe llevar un registro de las pruebas destructivas de soldadura (tabla 4.7) y señalarlas en un croquis para facilitar la ubicación de donde se realizaron estas pruebas (figura 4.2), con el propósito de llevar un control de éstas.

4.3.6 Pruebas en juntas de cortante (shear) y separación (peel)

Las pruebas de las juntas se realizan en tamaños del material apropiados para verificar que las condiciones de las juntas sean las ideales. Para pruebas de uniones de soldadura por fusión se toman muestras de 1.5 m de largo por 0.30 m de ancho, con la junta centrada en esta área; cuando se trate de soldadura por extrusión, el tamaño de la muestra será de 1 m de largo por 0.30 m de ancho; de la muestra que se tomó, serán cortadas 4 piezas con medidas de 2.5 cm de ancho por 15 cm de largo, las cuales se someterán a las pruebas de cortante y separación. La prueba será realizada hasta que ceda la geomembrana y por ningún motivo la unión debe fallar. Ambos especímenes deben exceder los valores del esfuerzo a que fue sometido la membrana y en la prueba cortante debe soportar arriba del 90% del valor en que cedió la geomembrana (material base) y en la prueba de separación un mínimo del 70%; si en esta prueba llega a fallar deberá ser tomada una nueva muestra, la cual será obtenida a 1 m lineal de donde se tomó la primera muestra. Las especificaciones de la prueba para este tipo de membranas son especificadas por las normas de la ASTM, para HDPE la D4437 al igual para VLDPE, para PVC la D3063 y D4113, para CSPE-R las D751 y D413 y para el IIR las D751 y D413.

FIGURA 4.2 Pruebas destructivas



4.3.7 Pruebas no destructivas

El objetivo de las pruebas no destructivas en campo es verificar la continuidad y confiabilidad de las juntas; entre las más comunes pruebas tenemos las siguientes:

Lanceta de aire o chifón. En este método se lanza aire a presión 3.5 kg/cm^2 , a través de un orificio de 5 mm de diámetro. El aire a presión es dirigido abajo del borde superior de la junta para detectar donde no están unidas propiamente; esto se puede registrar cuando se observa una pequeña ampolla o levantamiento, o se escucha un sonido, el cual cambia al presentarse un hueco; este método es aplicable para geomembranas flexibles y con espesores menores de 1.1 mm, no sirve para registrar zonas defectuosas en el interior de la junta o en membranas rígidas.

Prueba manual mecánica. En este método se usa una herramienta en forma de desarmador despuntado, el cual es colocado debajo de la orilla superior de la junta. Al ejercer palanca se puede observar las áreas que no han sido unidas propiamente. Esta prueba depende de la sensibilidad y la atención del personal.

Junta doble presurizada. Este método es el previamente mencionado cuando se menciona la soldadura por termofusión de doble cufa. En la abertura entre las dos juntas se inyecta aire o humo con una aguja con una presión de 2.1 kg/cm^2 en una longitud aproximada de 300 m. Si no se pierde presión significativamente durante el trayecto, indica que no hay desuniones; es aplicable sólo para este tipo de juntas.

Cámara de vacío. Se utiliza una caja de 1 m de largo con una tapa transparente, que es colocada sobre la junta enjabonada previamente y se aplica un vacío de 0.175 kg/cm^2 . Cuando una fuga es encontrada, se forma espuma, ocasionada por aire que entra por abajo del revestimiento, lo cual indica que hay una discontinuidad. Esta prueba sólo se puede aplicar a geomembranas con espesor mayor a 1 mm ya que al realizar el vacío se puede ocasionar deformaciones en la parte bsjs de la geomembrana.

Chispa eléctrica. Es una prueba que se realizaba en la fabricación de geomembranas para detectar pequeños orificios en revestimientos termoplásticos así como para revisar uniones. La prueba es realizada en geomembranas de polietileno; utiliza alto voltaje, entre 15 y 30 kv, y los defectos en la junta son detectados por el salto de una chispa. En ocasiones es colocado un alambre entre la junta a todo su largo; una vez realizada, se aplica una carga de 20,000 volts en una de las puntas del alambre y es movido lentamente a lo largo de la junta.

Métodos ultrasónicos. Existen varios tipos de estas pruebas y una de ellas es la prueba llamada ultrasónico de eco de pulso, la cual es una técnica para medir el espesor y sólo es usada para geomembranas no reforzadas; una pulsación de alta frecuencia, de 160 a 185 MHz es aplicada a la geomembrana superior y en caso de una buena junta, se refleja en la parte baja de la geomembrana inferior; si se presenta un defecto en la junta, se refleja en la interfaz donde la junta no está correctamente realizada. Para el uso de este método se necesitan dos transmisores, un generador de pulso y un monitor; no puede ser usado para juntas de extrusión de filete ya que su espesor no es uniforme. El método ultrasónico de impedancia trabaja por el principio de resistencia acústica, donde una onda continua de 160 a 185 kHz es aplicada a través del revestimiento sellado. El método de la sombra ultrasónica usa dos transmisores, en el que uno manda la señal a la membrana superior y el otro recibe la señal del otro lado de la junta; dependiendo de la amplitud de onda mostrada en el monitor, es la calidad de la junta, este método puede ser empleado en todo tipo de juntas, incluyendo las de difícil acceso.

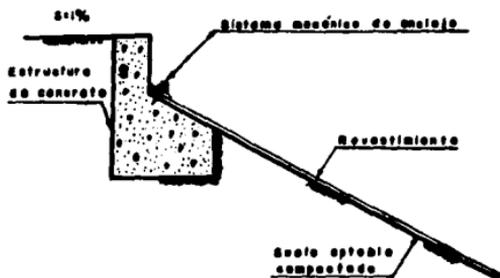
4.4 Sistema de anclaje

El sistema de anclaje será construido por el contratista del terraplén bajo las especificaciones del diseño del sistema. Cuando se tienen ciertos sistemas de revestimientos en tanques, canales, o depósitos de desechos sólidos, el anclaje de la membrana en la parte superior del talud puede ser formal o rústico. Un sistema formal de anclaje consta de pijas o pernos de fijación de 12 mm separados de 15 a 30 cm centro a centro y de una solera o barra de anclaje de 6.3 a 51 mm en sección transversal; generalmente, la barra es una aleación de aluminio, aunque también se usa acero inoxidable. Los pernos se colocan en el concreto del deflector de olas como en la (figura 4.4a); si no existe, se cuela en una trinchera una viga de concreto figura 4.4b de por lo menos 15 cm de ancho, con una sola varilla de refuerzo contra agrietamiento por temperatura.

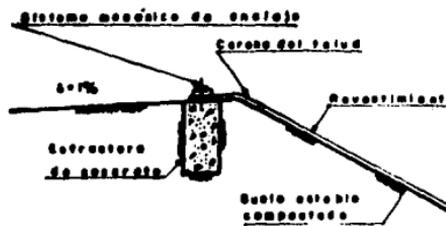
El anclaje rústico se hace excavando una zanja adyacente al hombro del talud, de sección transversal en forma de V o U. La profundidad de la zanja varía entre 30 y 40 cm, que es suficiente para soportar cualquiera de los sistemas de revestimiento normales. Después de colocar la membrana, se rellena la zanja con el suelo excavado cuando la membrana se encuentra en su estado de mayor contracción y se procede a compactar ligeramente (figura 4.4c).

En las estructuras de toma y descarga y en otros puntos donde se tenga que atravesar el revestimiento, las juntas se realizan en dos formas; el primer método consiste en hacer el sellado en el plano del revestimiento figura 4.4d; la segunda técnica recurre a una funda para el tubo, esta funda se fija a una brida fabricada por uno de los métodos de sellado en planta. En el campo, esta junta se adhiere al material base del revestimiento en el punto donde el tubo sobresale del mismo, los tubos de toma o descarga se introducen generalmente en el almacenamiento a través de una pequeña estructura de concreto. La junta entre el revestimiento y la estructura se efectúa en la parte superior del muro, en el plano del revestimiento, la estructura en sí no se reviste.

FIGURA 4.4 Detalles de anclajes

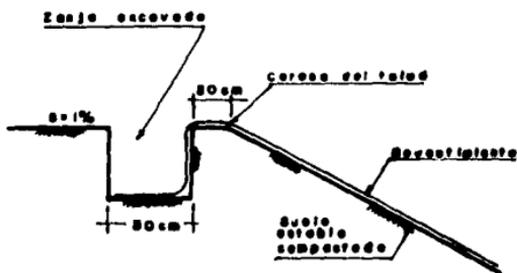


(a)

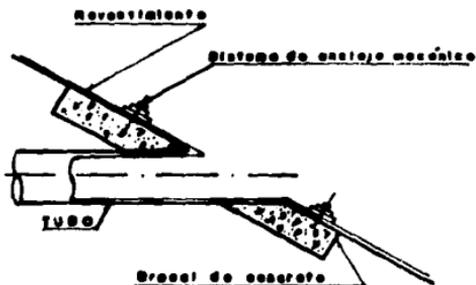


(b)

Detalles de Anclajes Superiores para todo tipo de Revestimientos



(c)



(d)

Selle en tuberías atravesando taludes

4.5 Daños y reparaciones

El encargado de obra o el técnico de aseguramiento de calidad (QA) y el inspector designado, inspeccionarán visualmente cada panel tan pronto como se hayan realizado las juntas y los defectos o daños serán marcados para ser reparados posteriormente. Después de realizar las reparaciones serán probadas con pruebas no destructivas, descritas previamente. Cuando se tienen agujeros menores de 6 mm y mayores de 6 mm pueden ser reparados por el método de extrusión plana. Cada vez que se realice alguna reparación, se deben tomar en cuenta varios aspectos, como el mantener limpias las superficies donde se realizan las operaciones, al igual que el equipo debe estar en buenas condiciones; todos los parches deberán extenderse por lo menos 10 cm de la orilla del defecto y los parches deberán tener las orillas redondeadas. Algunas veces se presentan arrugas como resultado de la expansión por temperatura, que no son fáciles de extender al poner peso sobre éstas; en estos casos se deberá realizar un corte en la parte baja del talud y estirar la membrana, posteriormente se reparará el daño con alguna técnica de parchado.

4.6 Control de calidad de fabricación (MQC), aseguramiento de calidad de fabricación (MQA), control de calidad en la construcción (CQC) y aseguramiento de calidad en la construcción (CQA).

Todos los materiales de las geomembranas son propensos a tener defectos, lo cual ocasiona fugas; cuando el revestimiento es colocado bajo presión hidrostática, se producirán altos valores de pérdidas o fugas; en caso de existir un defecto, cuando se tiene un sistema, se inspecciona por los responsables del control de calidad (QC) y del aseguramiento de calidad (QA). En los geosintéticos, los cuales son manufacturados y colocados por dos diferentes organizaciones, se necesita tener otro de programa de evaluación de calidad; por lo que vamos a definir estos aspectos los cuales son empleados durante la realización de un sistema revestido con geosintéticos.

- **Control de calidad de fabricación (MQC).** Es un sistema de inspección planeado, usado directamente para registrar y controlar la fabricación de un material en la planta. El Control de calidad de fabricación (MQC) es normalmente realizado por el fabricante del geosintético y es necesario para asegurar un mínimo o máximo de los valores especificados en la elaboración del producto. El control de calidad de fabricación (MQC) es referido por las medidas tomadas por el fabricante para obtener la compatibilidad de los requerimientos por los materiales y la mano de obra con la requerida en documentos certificados, planes y especificaciones del contratista.
- **Aseguramiento de calidad de la fabricación (MQA).** Es un sistema de actividades planeado que proveen un aseguramiento para que los materiales sean fabricados como las especificaciones de los documentos y los planes contratados. El incluye, por parte del fabricante, inspecciones, verificaciones y evaluaciones de los materiales usados para la elaboración de los geosintéticos, con objeto de asegurar el control de calidad durante el proceso de elaboración. El aseguramiento de calidad de la fabricación (MQA) es referido por las medidas tomadas por la organización del aseguramiento de calidad de la fabricación (MQA) para

determinar si el fabricante cumple con los requerimientos de materiales y mano de obra, condicionado en documentos certificados, planes y especificaciones del contratista.

- **Control de calidad en la construcción (CQC)** Es un sistema de inspecciones planeado que son usadas directamente para verificar el control de calidad de la construcción de un proyecto. El control de calidad en la construcción (CQC) es normalmente realizado por el instalador del geosintético para registrar la alta calidad en la construcción. El control de calidad en la construcción (CQC) es referido a las medidas tomadas por el instalador para determinar la compatibilidad con los requerimientos de los materiales y la mano de obra, condicionado en documentos certificados, planes y especificaciones del contratista.
- **Aseguramiento de calidad en la construcción (CQA)**. Es un sistema de actividades planeado que proveen el aseguramiento de que el sistema fue construido conforme a las especificaciones. El aseguramiento de calidad en la construcción (CQA) incluye inspecciones, verificaciones y evaluaciones de los materiales y mano de obra necesarias para determinar y documentar la calidad de la construcción. El aseguramiento de calidad en la construcción (CQA) es referido para las medidas tomadas por la organización del aseguramiento de calidad en la construcción (CQA) para asegurar que la instalación es compatible con los planes y especificaciones del proyecto.

Los geosintéticos son materiales de la nueva ingeniería; comparadas con el acero, concreto, etc y cada detalle debe ser considerado cuidadosamente para prevenir las fallas durante todo el proceso. Esta es la razón del riguroso control de calidad y por sus condiciones de servicio específicas, principalmente para fines de protección al medio ambiente.

5 COSTOS

Para desarrollar la agricultura en regiones muy castigadas por la sequía, se exige un perfecto sistema de riego; en este caso, la construcción de conducciones y vasos de agua que eviten la pérdida del preciado líquido principalmente a través de filtraciones por el suelo, surge como la primera providencia a tomar. La parte más crítica del sistema en los canales de regadío es por pérdidas por filtración y es aquí donde resulta de gran importancia el revestimiento de los canales. Actualmente, gracias a la técnica moderna, se ha implantado el uso de membranas impermeables; sin embargo, el usar estos productos depende de las posibilidades económicas del país y de las características de la región, como los movimientos sísmicos, que puede ser uno de los principales factores a considerar para el uso de membranas impermeables.

Sería lo ideal utilizar un revestimiento de membrana y cubrirlo con suelo pero el alto costo al usar dos revestimientos se torna imposible de realizar; por tanto, una buena propuesta es la de utilizar sólo recubrimientos plásticos ya que en la actualidad las geomembranas pueden usarse expuestas a la intemperie como el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno clorado (CPE), el polietileno clorosulfonado (CSPE), el hule butilo (IIR) y algunas de cloruro de polivinilo (PVC).

Es conveniente analizar al menos tres tipos de productos en cualquier proyecto, como los sistemas para agua potable o para riego. Para este último fin, se debe verificar que la membrana no contenga metales pesados; además de sus propiedades fisicoquímicas, influyen en la sección del material de revestimiento la disponibilidad, costo, métodos de unión y reparación, así como los antecedentes históricos de comportamiento.

5.1 Datos de diseño

En este capítulo se analizarán los costos de revestimiento con diferentes geomembranas para un canal de 4000 m de longitud con capacidad de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, $s = 0.001$ y $b = 1 \text{ m}$.

El diseño de los canales depende de varios aspectos, algunos de los cuales no pueden ser conocidos con precisión, como son los esfuerzos a que se someterá una geomembrana desde su fabricación hasta la puesta en servicio de la obra, por lo que existen requisitos mínimos para el diseño que le permita soportar ciertos impactos, paso de personas, viento e instalación; por esta razón, se han elaborado normas mínimas para uso general de geomembranas, que pueden aplicarse a las obras hidráulicas como canales de riego y tanques de almacenamiento de pequeñas dimensiones.

Tabla 5.1 Requisitos mínimos para geomembranas en obras hidráulicas (Koerner 1994)

Propiedad	Tipo de geomembrana		Método de prueba de ASTM
	sin refuerzo	con refuerzo.	
Espesor milésimos de pulg	30	20	D 1593
Resistencia última (lb/pulg)	15	50	D 882
Elongación a la falla (%)	150	100	
• Mod. Tan. inicial (lb/pulg)		200	
• Mod. Sec. 100 % def. (lb/pulg)	5		
Prueba de resistencia			
• Al desgarre (lb)	5	50	D 1004
• A la perforación (lb)	20	40	D 3787 barra 5/16"
• Al impacto (ft/lb)	5	10	D 1790
Resistencia en uniones (% de la máxima)	80	80	D 882 en cortante

Las dimensiones del canal fueron calculadas para una sección trapezoidal con con ancho de talud de 1 m, taludes de 1:1 para geomembranas flexibles de PVC e IIR y un talud de 3:1 para

Capítulo 5

geomembranas rígidas de HDPE y Bentonita (GCL's); con estas especificaciones dimensionales del sistema se realizó el diseño de la sección obteniendo el área de ésta:

$$A = hd + md^2$$

donde:

b = 1 m
d = tirante
m = talud

d fue propuesto hasta encontrar el área apropiada que al multiplicarse con la velocidad ($Q=VA$) resulte el gasto de proyecto ($5 \text{ m}^3/\text{s}$).

- Para encontrar la velocidad, se calculó con la fórmula de Manning.

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2}$$

donde:

R = radio hidráulico $\frac{bd + md^2}{b + 2d\sqrt{1+m^2}}$

S = pendiente (0.001)
n = 0.0136 para PVC
n = 0.0135 para HDPE
n = 0.0220 para GCL's
n = 0.0136 para IIR

- Con estos datos se obtuvo el gasto de proyecto de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ por medio de la fórmula de continuidad:

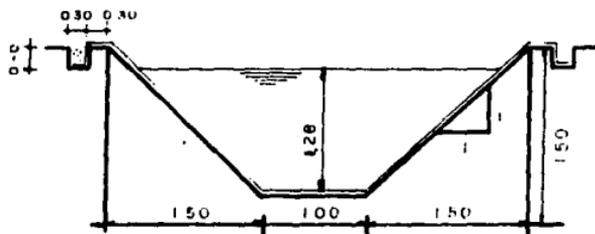
$$Q = VA$$

donde:

V = velocidad
A = área de la sección

Las secciones del canal calculado son mostradas en la figura 5.1a para membranas flexibles PVC e IIR, 5.1b para membrana de HDPE y 5.1c para geomembranas de GCL's.

FIGURA 5.1 Canal con talud 1:1 (a) para geomembranas flexibles (PVC, IIR) Canal con talud 3:1 (b) para geomembranas rígidas (HDPE) y 3:1 (c) para geomembranas rígidas (GCL's)



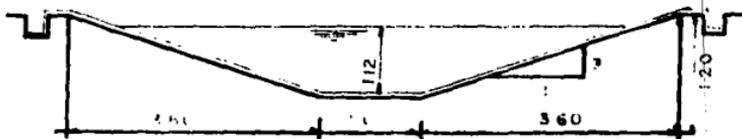
(a)

DESARROLLO DE (PVC) E (IIR) 11.4 m



(b)

DESARROLLO DE (HDPE) 9.12 m



(c)

DESARROLLO DE (GCL) 10.38 m

ESCALA 1:50
ACOT. m

5.2 Costo de revestimiento con membrana de hule butilo (IIR)

Según los datos del proyecto se necesitan para membranas flexibles 7.04 m de desarrollo por 4000 m de longitud que representa un total de **28,160 m²** por revestir.

Cuando se utiliza geomembrana de hule butilo (IIR) se pueden realizar lienzos hasta de 1500 m² en fábrica, donde las juntas se realizan por medio de vulcanización, método de gran confiabilidad por su calidad. Las juntas que se necesiten realizar en campo, son hechas por medio de adhesivos especiales que el mismo fabricante proporciona. Previamente a realizar las juntas, se debe cardar (con cepillo de alambre o rodillo escarificador) en ambas caras de contacto. La medida de los traslajos para realizar la junta será de 20 cm; cada módulo se dobla y empaqueta para reducir al máximo el trabajo de campo, una vez que cada uno de ellos pasa las normas del control de calidad, se dobla en dos pasos:

- En forma de acordeón o dobleces.
- De nuevo en forma de acordeón formándose un cubo de 1.10 m de largo por 1.10 m de ancho, (figura 5.2a)

El desdoblado del módulo se realiza en sentido inverso al doblado (figura 5.2b), extendiendo el paquete en un acordeón de 1.10 m por su largo, para después extender el lienzo hasta sus dimensiones normales.

Los módulos a considerar para el canal serán 22, con dimensiones de 7.04 m de ancho por 180 m de largo y uno sólo de 7.04 m de ancho por 44.6 m de largo; para los traslajos se consideran 23 de 20 cm cada uno.

- (23 x (0.20 x 7.04))

traslajos 32.384 m²

Capítulo 5

Para los imprevisos se considera un 1 %

$$\bullet (0.01 \times 28160)$$

extras 281.6 m²

El total de los metros cuadrados requeridos para el revestimiento son:

28.472.98 m²

Las características del hule butilo (IIR) marca ETERNOLITA (1 mm), con durabilidad esperada de 15 años expuesta a la intemperie, son las siguientes:

Propiedades Físicas	Especificaciones	Método de la prueba
Resistencia a la tensión kg/cm ²	84 (mínimo)	ASTM D412
Elongación al Punto de Ruptura %	400	ASTM D412
Módulo a 300 % de elongación kg/cm ²	42	ASTM D412
Añejamiento en ozono, 50n O ₃ x 10 ³ de aire a 40 ^o C a 20 % de estiramiento	sin grietas	ASTM D1149-64
Añejamiento en aire 7 días a 121 ^o C		
Resistencia a la tensión % retenido	75	ASTM D573-53
Elongación al punto de ruptura kg/cm ² % retenido	75	B S 903 parte A19
Absorción de agua en 72 h a 100 ^o C		
Hinchamiento del volumen % retenido	3	
Dureza Shore A-punto de cambios	5	
Resistencia a la tensión % retenido	95	ASTM D471-57
Punto de cristalización en ^o C	- 40 ^o C	ASTM D 746-64
Resistencia al desgarre kg/cm	27	ASTM D624-54

Las normas de la ASTM (1988) indican que al utilizar un revestimiento de hule butilo (IIR) para canales debe contar con las siguientes especificaciones como mínimo:

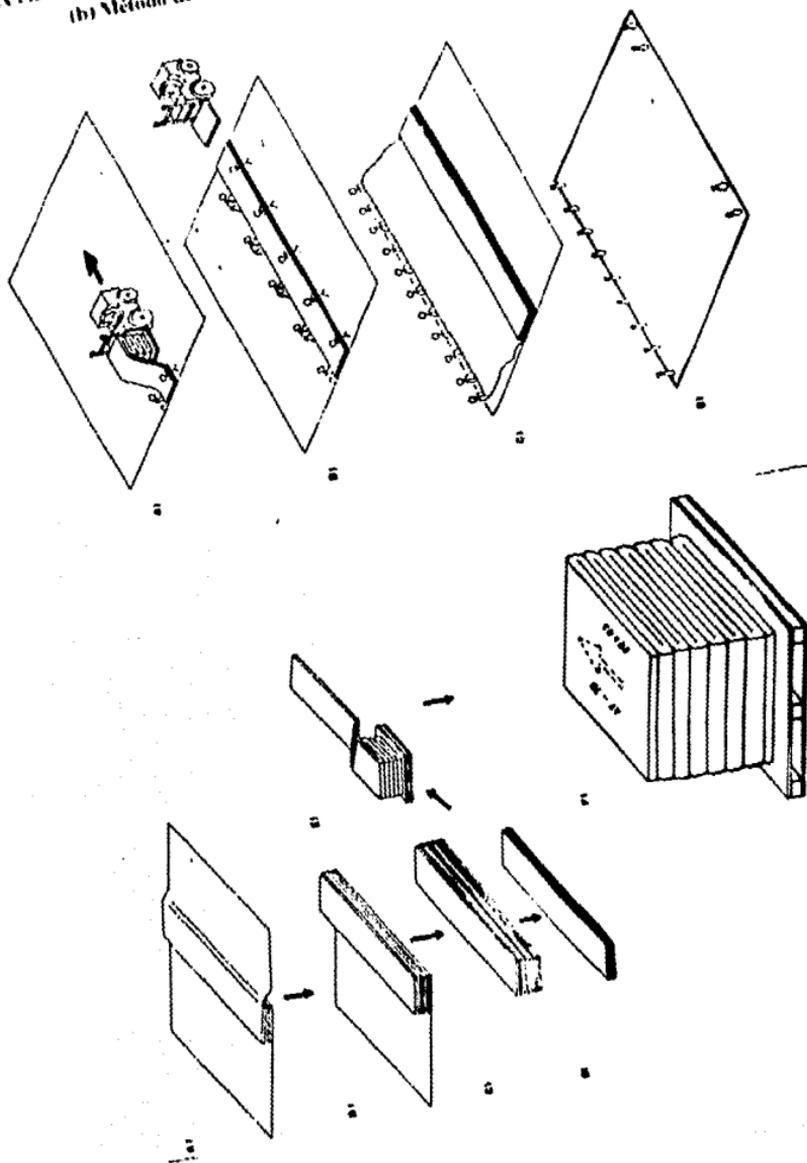
Capítulo 5

Propiedad	Especificaciones
Dureza Shore A	60 ±10
Resistencia a la tensión, MPa (psi)	8.3 (1200)
Modulo a 300% de elongación, Mpa, (psi)	4.1 (600)
Resistencia al desgarre, kN/m (1bf/in)	22.01 (125)
Absorción de agua, después de 166 h a 70°C	± 1%
Punto de cristalización °C	-40
Elongación al punto de ruptura %	300
Resistencia al ozono después de 166 h a 40°C a 20% de estiramiento	sin grietas
Elongación al punto de ruptura del original (% retenido) después de 166 h a 115°C	60
Resistencia a la tensión (% retenido) después de 166 h a 115°C	60

El valor del de hule butilo (IIR) (junio 1995) es de	N\$ 31.00 m²
Costo del material N\$ 31.00 x 28,473.98 m ²	N\$ 882,693.68
La instalación depende de la cantidad a instalar > 10000 m ²	N\$ 3.40 m²
Total por metro cuadrado instalado N\$ 3.40 x 28,192.38	N\$95854.092
Costo del total del proyecto	<u>N\$ 978,647.72</u>

NOTA El costo incluye 15% de IVA

FIGURA 5.2 (a) Sistema de doblado en planta
 (b) Método de desdoblamiento



5.3 Costo de revestimiento con membrana de PVC

Las dimensiones del canal por revestir son **28,160 m²** más los traslapes. El tamaño de los módulos son 108 piezas de 37.1 m de largo por 7.04 m de ancho y un lienzo de 15 m de largo por 7.04 m de ancho.

El diseño de los módulos prácticamente elimina la unión vertical sobre los terraplenes. Todas las uniones de fábrica o campo se realizan paralelas una con otra y la intersección de dos o más uniones se evita al máximo. Las uniones realizadas en fábrica se realizan por medio de soldadura de alta frecuencia o por medio del método de cuña caliente. Las soldaduras en campo se realizan por medio de solvente o adhesivo, utilizando un producto químico proporcionado por el proveedor de la geomembrana, el cual es formulado conforme al tipo de membrana a utilizar. Los traslapes serán de 20 cm cada uno.

El sistema de doblado es el mismo método usado para el hule butilo (IIR), cada módulo se dobla y empaca para reducir al máximo el trabajo de campo, una vez que cada uno de ellos pasa el control de calidad, se dobla en dos pasos:

- En forma de acordeón en dobleces de 1.10 m por su largo
- De nuevo en forma de acordeón en dobleces de 1.10 m formándose un cubo de 1.10 m de largo por 1,10 m de ancho (figura 5.2a)

El desdoblado del módulo se realiza en sentido inverso al doblado figura (5.2b), extendiendo el paquete en un acordeón de 1.10 m por su largo, para después extender el lienzo hasta sus dimensiones normales.

Como hablamos mencionado los módulos a considerar serán 108 de 7.04 m de ancho por 37.13 m de largo y uno sólo de 7.04 m de ancho por 15 m de largo y para los traslapes se consideran 109 de 20 cm cada uno.

Capítulo 5

- (109 x (0.20 x 7.04))

Traslapes 162.064 m²

Para los imprevistos se considera un 1 %

- (0.01 x 28160)

Extras 281.6 m²

El total de los metros cuadrados requeridos para el revestimiento de PVC son: **28593.66 m²**

Las normas de la ASTM (1988) indican que al utilizar un revestimiento de cloruro de polivinilo (PVC) para canales debe contar con las siguientes especificaciones como mínimo:

Propiedades	Especificaciones	
Espesor, al especificado Milésimos de pulg.	0.20 a 0.39	0.40 a 0.76
Resistencia a la tensión kg/cm ²	140	140
Resistencia de las juntas % mínimo de la resistencia a la tensión	80	80
Agujeros y grietas, máximas por 8.36 m ²	1	1
Resistencia enterrado en suelo		
• Cambios en la resistencia a la tensión %	15	15
• Pérdida de elongación %	20	20
Extracción de agua %	0.35	0.35
Pérdida por volatilización %	1.0	1.0

El tipo de geomembrana para revestir es de cloruro de polivinilo (PVC) suministrado por Geoproductos Mexicanos (1 mm) con durabilidad esperada de 8 años expuesta al intemperie.

Capítulo 5

El valor de cloruro de polivinilo (PVC) (junio de 1995) es de	N\$ 29.00 m ²
Costo del material N\$ 29.00 x 28593.32	N\$ 82,9216.40
La instalación depende de la cantidad a instalar > 10000 m ²	N\$ 7.70 m ²
Costo total de instalación N\$ 7.00 x 28,312.06 m ²	N\$198,184.42
Costo total del proyecto	<u>N\$1,027,499.82</u>

NOTA El costo incluye 15% de IVA

5.4 Costo de revestimiento con membrana de (HDPE)

Cuando utilizamos membranas rígidas es aconsejable utilizar el talud 3:1 debido a su baja fricción del material y a su rigidez por el sistema de anclado. Por tanto, esto cambia las dimensiones del sistema de riego (figura 5.1b)

Según los datos del proyecto se necesitan 9.12 m de desarrollo x 4000m de longitud es un total de **36,480 m²** para membranas rígidas.

Cuando se utiliza geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) se pueden realizar lienzos hasta 1500 m² en fábrica dónde los paneles se realizan con dimensiones de 7.2 m de ancho por 218 m de largo. Las juntas que se necesiten realizar en campo, son hechas por medio de termofusión o extrusión y la medida de los traslajos para realizar la junta será de 10 cm cada uno. La membrana se suministra en rollos y para la instalación sólo se desenrolla manualmente o con la ayuda de maquinaria.

Los módulos a considerar serán 23, con dimensiones de 7.2 m de ancho por 218 m de largo y uno sólo de 7.2 m de ancho por 110.72 m de largo y para los traslajos se consideran 38 de 10 cm y uno sólo de 10 cm por los 4000 m de largo.

- $(19 \times (0.1 \times 7.2)) = 13.68 \text{ m}^2$
- $(19 \times (0.1 \times 1.92)) = 11.172 \text{ m}^2$
- $(1 \times (0.1 \times 4000)) = 400 \text{ m}^2$

Traslajos 417.32 m²

Para los imprevistos se considera un 1%

- $(.01 \times 36480)$

Extras 364.8 m²

El total de los metros cuadrados requeridos para el revestimiento son:

37262.12 m²

Capítulo 5

Las características del polietileno de alta densidad marca SLT (1 mm), con durabilidad esperada de 10 años expuesta a la intemperie, son las siguientes:

Propiedades	Características
Densidad	0.944 g/cm ³
Resistencia a la tensión	36 kg/cm
Resistencia al rasgado	13.99 kg
Elongación al punto de ruptura	800%
Pérdida por volatilización	0.10%
Resistencia al ozono	sin grietas
Resistencia a la perforación	25 kg
Absorción de agua	<0.01
Coefficiente de expansión térmica 10 ⁻⁴ /°C	1.2
Contenido de negro de humo	2.5%

Las normas de la ASTM (1988) indican que al utilizar un revestimiento de polietileno de alta densidad (HDPE) para canales debe contar con las siguientes especificaciones como mínimo:

Propiedad	Especificaciones
Resistencia a la tensión	140 kg/cm ²
Elongación al punto de ruptura	500%
Resistencia al rasgado	31 kN/m
Resistencia al impacto	170 kN
Contenido de cenizas	0.5%

El valor del polietileno de alta densidad (HDPE) (junio de 1995) es de	N\$ 15.12 m²
Costo del material N\$ 15.12 x 37,262.12 m ²	N\$ 563,403.25
La instalación depende de la cantidad a instalar > 10000m ²	N\$ 7.44 m²
Costo de instalación N\$ 7.44 x 36,897.32 m ²	N\$ 274,516.06
Costo total del proyecto	<u>N\$ 837,919.30</u>

NOTA El costo incluye 15% de IVA

5.5 Costo de geomembrana de bentonita (GCL)

Como habíamos mencionado, cuando utilizamos membranas rígidas es aconsejable realizar el talud 3:1 debido a la baja fricción de la geomembrana de arcilla sobre el suelo de apoyo. Esto cambia las dimensiones de la sección transversal del canal; según los datos del proyecto, se necesitan 10.38 m de desarrollo x 4000 m de longitud es un total de 41,520 m² para membranas de bentonita.

La bentonita se suministra en rollos de 4.5 m de ancho por 60 m de longitud, para facilitar su manejo, almacenamiento e instalación. No se requiere el empleo de equipo especial para unir las juntas, ya que con un simple traslape y bentonita granular en medio de la junta se forma un sello en esa zona; al hidratarse el material; el traslape se hará de 15 cm, los bordes deben colocarse estirados al máximo para maximizar el contacto, evitando arrugas en la zona de contacto entre paños adyacentes; la cantidad de la bentonita vertida en el traslape es a razón de 1.8 kg por metro lineal.

Los módulos a considerar serán 160, con dimensiones de 4.5 m de ancho por 60 m de largo y uno sólo de 4.5 m de ancho por 49.85 m de largo y para los traslapos se consideran 67 de 15 cm y 3 de 15 cm por los 4000 m de longitud.

$$\bullet (1 \times (0.15 \times 4000)) = 600 \text{ m}^2$$

$$\bullet (1 \times (0.15 \times 4000)) = 600 \text{ m}^2$$

$$\bullet (1 \times (0.15 \times 4000)) = 600 \text{ m}^2$$

$$\bullet (67 \times (0.15 \times 13.08)) = 131.45 \text{ m}^2$$

Traslapes 1904.31m²

Para los imprevistos se considera un 1 %

$$\bullet (0.01 \times 41,520)$$

Extras 415.20 m²

El total de los metros cuadrados requeridos para el revestimiento son:

43,039.51m²

Capítulo 5

El material a usar es Bentonita **BENTOMAT (1 cm)** con durabilidad esperada de 10 años expuesta al intemperie, son las siguientes:

Propiedades	Características
Masa por unidad de area	1.0 lb/ft ²
Permeabilidad de agua	1x10 ⁹ cm/s
Resistencia a lapenetración	170 lb
Contenido inicial de humedad	10 0%
Angulo de fricción interna	25 ^o

NOTA: este revestimiento necesita una cubierta como mínimo de 30 cm de arcilla compactada.

El valor del de bentonita (junio de 1995)	N\$ 30.00
Costo del material N\$ 30 x 43839.51 m ²	N\$1,315185.3 m ²
La instalación depende de la cantidad a instalar > 10000m ²	N\$ 3.5 m ²
Costo de instalación N\$ 3.50 x 43009.11 m ²	N\$ 150531.88
Costo total del proyecto	<u>N\$ 1465717.185</u>

NOTA El costo incluye 15% de IVA

5.6 Recomendaciones

En el ejemplo anterior, se determinó que el sistema de revestimiento era para fines agropecuarios; en caso que se vaya a utilizar otro líquido, se debe analizar si el revestimiento es compatible con el líquido a ser usado; se puede consultar la tabla 2.6 en la que se presenta la resistencia de la geomembrana a diversos agentes químicos de la geomembrana. También se deben revisar las condiciones del suelo por revestir, previamente a seleccionar alguna opción; el espesor depende principalmente de las condiciones de servicio del sistema.

Algunos revestimientos deben ser cubiertos con suelo, como en el caso de los de bentonita. Estos pueden ser afectados por la erosión ocasionada por la velocidad del flujo; dependiendo del tipo de suelo que fuera usado para revestir; existen datos empíricos de la velocidad permisible para diferentes tipos de revestimientos con suelos en canales. En el caso del canal considerado, se tiene una velocidad calculada de 1.45 m/s; no existe ningún problema del tipo de revestimiento de suelo que se deseara usar, por estar muy debajo la velocidad de la que pueda afectar cualquier tipo de revestimiento. Sin embargo, debe ser analizado previamente en el diseño del canal dependiendo del tipo de geomembrana sugerida. Cuando la membrana no es cubierta, el coeficiente de Manning de los polímeros es muy similar al de concreto hidráulico con acabado liso (0.015), por lo tanto el factor de velocidad sólo es incrementado en un pequeño porcentaje.

Como se había mencionado, se usan normalmente taludes 1:1 para membranas flexibles y 3:1 para membranas rígidas. Aunque no se mencionó, se podría utilizar un geotextil entre la geomembrana y el suelo debido a la poca fricción que existe entre éstas o para ser usado como dren en la interfaz suelo-geomembrana.

Ningún sistema que haya sido revestido con geomembranas, deberá ser descuidado ya que debe existir una estricta vigilancia, ya que muchas veces son dañadas por vandalismo, o por roedores

Capítulo 5

que destruyen las membranas o simplemente por ganado que cruza a través del revestimiento. También se debe llevar un registro de las condiciones de servicio durante su vida útil, con el fin de tener una amplia referencia sobre el tema.

Como podemos observar desde el punto de vista económico, la inversión es demasiado alta revistiendo con geosintéticos. Si se considera revestir con bentonita se debe adicionar un revestimiento de suelo que incrementaría notablemente el costo; además resulta que si se usara HDPE de 1.5 mm, cuya su vida de servicio es de 15 años, el costo se incrementaría un 50% aproximadamente; un caso similar es el uso de PVC de 1.5 mm; el análisis del costo del sistema usando diferentes productos se presenta en la siguiente tabla:

Inversión inicial	Producto	Marca	Tiempo estimado	Costo estimado de servicio por año
N\$ 1465717.185	Bentonita	Bentomat	10 años	N\$ 146,571.71
N\$ 978547.72	IIR	Eternolita	15 años	N\$ 65,232.51
N\$102400.82	PVC	Geoproductos Mexicanos	6 años	N\$171,233.47
N\$ 837919.31	HDPE	SLT	10 años	N\$ 83,791.93

En esta tabla se observa que el sistema más costoso es con geomembranas de arcilla (GCL's) y el más económico de la inversión inicial al igual que su vida de servicio, por su durabilidad, resistencia al ozono y rayos ultravioleta es el hule butilo (IIR); sus juntas son de gran confiabilidad logrando un sistema de baja permeabilidad.

Capítulo 5

Otros costos de geomembranas de diferentes marcas son analizados; éstos fueron proyectados con un incremento inflacionario, acumulado de marzo de 1993 a junio de 1995 del 33.095%, los costos de 1993 fueron proporcionados por el Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (Munillo 1993)

Analizando el costo del mismo canal de riego con los productos proyectados a junio de 1995 se observa que la inversión es demasiada alta al igual a los analizados previamente y que el costo depende del material y el espesor; lo más recomendable es analizar diferentes productos para poder seleccionar el producto más apropiado ya sea por su costo y por las condiciones de servicio.

Material	Marca	Espesor mm	Esperanza de vida en años	Costo 1993	Costo 1995
PVC	Tecnosuelo	1	6	N\$ 767,167.89	N\$ 1021062.10
PVC	Sansuy	1	6	N\$ 812,631.81	N\$ 1081572.38
HDPE	National Seal Company	1	5	N\$ 1,004586.75	N\$ 1038692.47
HDPE	Tecnosuelo		5	N\$ 788,839.08	N\$ 1049905.37
CSPE	Tecnoisuelo	1	20	N\$ 1,536050.87	N\$ 2044408.88
IIR	Tecnoisuelo		15	N\$ 788,839.08	N\$ 1049905.37
Revestimiento de concreto		0.70	20	N\$ 757,731.99	N\$ 1008503.39

6 Conclusiones

Las geomembranas son productos impermeables usadas ampliamente en años recientes, como revestimientos superficiales y como barrera impermeable. Han sido usadas en canales y estanques de agua; sin embargo, una de las grandes aplicaciones es el contener líquidos peligrosos o crear una barrera impermeable en los depósitos de desechos sólidos: estos usos y otros tipos de aplicaciones han ocasionado un amplio desarrollo en la industria de los geosintéticos en los últimos años.

La función principal de las geomembranas es evitar el flujo de un líquido de un lado para otro o minimizar las pérdidas por filtraciones a través del suelo; cuando se habla sólo de minimizar se refiere a que ningún material es completamente impermeable y las membranas tienen muy baja permeabilidad; en un principio se utilizaban como barreras impermeables o revestimientos a los suelos finos compactados; pero la reducida conductividad a los fluidos de las geomembranas ($k < 10^{-11}$ cm/s) han sustituidos a los primeros.

Los fluidos a contener pueden ser desde agua hasta un líquido altamente contaminante, entre los cuales se pueden citar a los químicos, aceites o a los que se crean en los depósitos de desechos sólidos (lixiviados) entre otros. En los depósitos u obras de conducción de agua, se puede reducir el costo de ésta cuando disminuyen las pérdidas durante el flujo o almacenamiento; estas pérdidas son ocasionadas principalmente por filtraciones a través del suelo y se pueden evitar al usar un revestimiento de geomembrana; otra razón para el uso de geomembranas son las condiciones desfavorables del suelo, que no permiten el uso de métodos tradicionales de revestimiento como el concreto hidráulico o las arcillas compactadas.

Cuando tenemos líquidos contaminantes se deben usar también revestimientos de geomembranas, principalmente de polietileno de alta densidad (HDPE) por ser el más resistente a estos agentes; en caso de no evitar el flujo de un líquido lixiviado, éste puede filtrarse a través del subsuelo hasta llegar a los mantos freáticos y contaminarlos. En los países industrializados la ley indica que las obras contenedoras de líquidos y sólidos contaminantes deben ser revestidos con geomembranas, esto se debe principalmente a que tienen más conciencia del daño que el hombre ocasiona al medio ambiente.

Para la conducción y almacenamiento de agua potable o para riego es común utilizar membranas de PVC, IIR y CSPE de grado potable; la selección del tipo de polímero depende por lo general en la durabilidad requerida de la obra ya que el primero tiene una vida útil expuesta al ambiente de 6 años, el segundo de 15 años y el último de 20 años.

Los costos usando revestimientos con geosintéticos son altos si los comparamos con el uso de otras técnicas, por esta razón sólo debemos recurrir a la utilización de estos productos cuando sea indispensable, como contención de contaminantes o cuando las condiciones del suelo no sean óptimas, como sucede en suelos muy permeables o en lugares de escasez de arcillas. Para evaluar económicamente la inversión inicial de revestir con geomembranas que es bastante alta, se debe dividir ésta en el tiempo de vida que este producto ofrece y así comparar el costo real por año que implica el usar estos productos. Estos productos tienen como característica el ser muy sensibles al ataque de animales y vandalismo por lo que debe tenerse especial atención para evitar sean dañados por estas causas.

El éxito de un sistema de impermeabilización depende fundamentalmente del cuidado con el que se instale y se supervise esta colocación, lo que se logra realizando un estricto control de calidad del producto, de las operaciones de colocación y de la efectividad de las uniones.

Capítulo 6

El empleo de membranas en México se realiza desde hace 15 años, en un principio con escaso éxito, pero con la participación de personas interesadas en el tema y de los productores de los geosintéticos se han obtenido mejores resultados; hoy en día podemos encontrar una gran variedad de productos, todos con diferentes características según su formulación, lo cual da como resultado mejores productos y si a esto lo conjugamos con un buen diseño del sistema usando geosintéticos, se pueden lograr soluciones bastante confiables de impermeabilización.

La inversión usando esta técnica es alta, debido a que la materia prima casi en su totalidad es importada. En México se tiene una buena industria petrolera al igual que petroquímica, aspectos básicos para la fabricación de polímeros. Si se enfocaran esfuerzos en este sentido podríamos tener buenos productos de geosintéticos en México. Unos de los pocos productos realizados en nuestro país bajo este concepto es el Hule Butilo (IIR), el cual tiene buenas propiedades para ser competitivo y poder sustituir otros productos de importación.

RECONOCIMIENTO:

Agradesco al Ing. Rodrigo Murillo Fernández por la valiosa información facilitada para la realización de este trabajo y principalmente por su tiempo que me dedicó.

REFERENCIAS:

- ASTM (American Society for Testing and Materials) 1988, **Standards on Geosynthetics, Third Edition**, Philadelphia.
- Auvinet G.G. , Esquivel D.R. 1986, **Impermeabilización de Lagunas Artificiales**. LIMUSA- S.M.M.S. , México.
- Caloid Environmental Technologies Company, **Catálogo 1995**
- International Geotextil Society (IGS) 1990, **Proc. Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products**. The Houge.
- Koerner R. M. 1985 **Construction and Geotechnical Methods in Foundation Engineering**, Mc Graw Hill, Singapore
- Koerner R. M. 1993, **Construction and Geotechnical Engineering Using Synthrtic Fabrics**, New York
- Koerner R. M. 1994, **Designing with Geosynthetics**, Third Edition, Prentice Hall, N.J.
- Marquez B.G. 1981, **Estabilización de Suelos con Geosintéticos**, Tesis DEPEFI UNAM, México
- Murillo F.R. 1990, **Experiencias con Geomembranas, Geosintéticos: Geotextiles y Geomembranas**, S.M.M.S. , México
- Murillo F. R. 1993, **Tecnología para Revestimiento de Canales, Revestimientos Asfálticos y Membranas de Polímeros para Canales y Vasos**, Consultivo Técnico, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, No publicado.
- Murillo F.R. 1994, **Geomembranas Usuales en México**, XVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, S.M.M.S., Xalapa Veracruz.
- Murillo F.R. 1995, **X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones**, Informe aún no Publicado, México.

- National Seal Company, Catálogos 1995
- Pegg J. an D. 1990, Geosynthetics, Microstructure and Performance, ASTM, Philadelphia
- Rollin A.L., Fayoux D. 1991 Geomembranes Seaming Techniques, Geomembranes, Identification and Performance Testing, D.E. Chapman and Hall, London England.