



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PUNZONAMIENTO EN
GEOMEMBRANAS EN INTERFACES DE DEPÓSITOS DE
MINERALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CLAUDIO ANDRÉS GODOY BARBIERI

PROFESOR GUÍA:

LUIS PAREDES ACEVEDO

PROFESORES INTEGRANTES:

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA
PEDRO ACEVEDO MOYANO

SANTIAGO - CHILE
NOVIEMBRE 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: CLAUDIO GODOY B.
FECHA: NOVIEMBRE/2011
PROF. GUÍA: Sr. LUIS PAREDES A.

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PUNZONAMIENTO EN GEOMEMBRANAS EN INTERFACES
DE DEPÓSITOS DE MINERALES”

Uno de los procesos para la obtención de metales y minerales desde partículas pétreas, es a través de la confirmación de depósitos de minerales (pilas de lixiviación). Para esto las partículas son apiladas y posteriormente regadas con una solución ácida, la cual disuelve los minerales por percolación a través del material apilado.

Bajo las partículas a lixiviar se coloca un estrato de material drenante con tuberías de drenaje inmersas en éste, de esta forma se genera el flujo de la solución ácida enriquecida desde el material apilado hasta las tuberías de drenaje, para luego conducir la solución hacia piscinas para su posterior procesamiento.

Sobre el suelo de fundación y bajo el material drenante se instalan geomembranas, las cuales generan una barrera impermeable entre el depósito y el suelo de fundación. Éstas tienen como objetivo evitar que la solución ácida infiltre en el subsuelo, logrando no contaminar las napas subterráneas, no disolver las sales presentes en los suelos salinos (existentes en la zona en la cual se emplazan principalmente estos depósitos en Chile), y no perder solución ácida enriquecida con minerales.

El presente trabajo tiene como objetivo actualizar las expresiones de diseño, mediante las cuales se estima el espesor de la geomembrana requerida para así evitar el efecto del punzonamiento de ésta y perder la estanqueidad en la base del depósito.

Las geomembranas estudiadas son de polietileno lineal de alta densidad (HDPE). Para determinar su resistencia, se realizaron ensayos de punzonamiento hidrostáticos, mediante los cuales se correlaciona la presión hidrostática que produjo su rotura con el tamaño máximo y geometría de las partículas del material drenante.

Las expresiones de diseño utilizadas en la actualidad fueron desarrolladas en los 90', mediante ensayos hidrostáticos, pero éstas son conservadoras si se comparan con los resultados obtenidos en la presente investigación. La diferencia se produce principalmente por las mejoras que han sido realizadas en las materias primas utilizadas. A partir de lo anterior, se proponen modificaciones para dichas expresiones en función de las características de los materiales actuales y los criterios de diseño utilizados en Chile en la actualidad.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2.	ENSAYES DE PUNZONAMIENTO.....	4
2.1.	Ensaye geo-estático.....	4
2.2.	Ensaye hidrostático con conos truncados	5
2.3.	Ensaye hidrostático con partículas aisladas	7
2.4.	Ensaye hidrostático con paquetes de partículas	7
3.	ESTADO DEL ARTE.....	8
3.1.	Pilas de lixiviación.....	8
3.2.	Geomembranas	9
3.3.	Punzonamiento en geomembranas.....	12
3.3.1.	Polietileno de alta densidad (HDPE)	12
3.3.2.	Policloruro de vinilo (PVC).....	21
4.	EQUIPO PARA DESARROLLO DE ENSAYES	25
4.1.	Descripción del equipo de laboratorio	25
4.2.	Partículas utilizadas en los ensayos	30
5.	RESULTADOS	34
5.1.	Pilas de lixiviación.....	34
5.2.	Materiales geotécnicos.....	35
5.3.	Ensayes de punzonamiento geo-estáticos	39
5.4.	Caracterización de geomembranas	42
5.5.	Programa de ensayos.....	49
5.6.	Resultados de los ensayos	51
5.7.	Métodos de diseño	57
5.8.	Relación entre método de diseño propuesto y ensayos geo-estáticos	60
6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	62
7.	RECOMENDACIONES	66

ANEXOS

ANEXO A: ALGORITMO SISTEMA DE CONTROL

ANEXO B: PARTÍCULAS CONFECCIONADAS PARA EJECUCIÓN DE ENSAYES

ANEXO C: GRANULOMETRÍA DE MATERIALES ANALIZADOS

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Esquema pila de lixiviación.	1
---	---

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Confección de probeta y ejecución de ensaye geo-estático.	5
Figura 2.2: Esquema de instalación experimental.	6

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Imagen pila de lixiviación dinámica.	9
Figura 3.2: Estructura molecular polietileno de alta densidad (HDPE).	10
Figura 3.3: Estructura molecular polietileno de baja densidad (LDPE y LLDPE).	11
Figura 3.4: Estructura molecular poli cloruro de vinilo (PVC).	12
Figura 3.5: Ensayes hidrostáticos con conos truncados, HDPE.	14
Figura 3.6: Ensayes hidrostático con conos truncados y partículas aisladas, HDPE e=1.5 [mm].	15
Figura 3.7: Ensayes hidrostático con geotextiles, HDPE de e=1.5 [mm].	16
Figura 3.8: Deformaciones a largo plazo o <i>creep</i> , HDPE e=1.5 [mm].	17
Figura 3.9: Ensayes hidrostáticos con conos truncados, PVC y HDPE.	22
Figura 3.10: Factor de modificación por altura crítica de cono FM_{CCH}	23

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Esquema de la instalación de la geomembrana y conos truncados.	25
Figura 4.2: Esquema de equipo para el desarrollo de ensayos.	26
Figura 4.3: Variación de presión en ejecución del ensaye.	28
Figura 4.4: Variación de presión en ejecución del ensaye (tramo inicial).	29
Figura 4.5: Esquema emplazamiento y geometría de conos truncados.	30
Figura 4.6: Conos truncados y sensor de agua.	31
Figura 4.7: Carta de esfericidad y redondez de partículas.	32
Figura 4.8: Conos truncados y sensor de agua.	33

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Granulometría y clasificación USCS del material drenante y protector de la geomembrana.....	37
Figura 5.2: Granulometría y clasificación USCS del protector geomembrana.....	39
Figura 5.3: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor LLDPE texturizado simple.....	47
Figura 5.4: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor HDPE texturizado simple.....	47
Figura 5.5: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor HDPE lisa.....	48
Figura 5.6: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor HDPE lisa y texturizada.....	49
Figura 5.7: Geomembrana post ensaye de punzonamiento.....	51
Figura 5.8: Resultados punzonamiento hidrostático HDPE - conos truncados.....	52
Figura 5.9: Antecedentes y resultados punzonamiento hidrostático HDPE - conos truncados.....	53
Figura 5.10: Resultados conos truncados y partículas confeccionadas - HDPE.....	54
Figura 5.11: Presión de falla geomembrana HDPE 1.00 y 1.50 [mm] de espesor para alturas de conos inferiores a 25 [mm].....	55
Figura 5.12: Geomembrana post ensaye - LLDPE 1.00 [mm] de espesor.....	56
Figura 5.13: Curvas de diseño geomembranas HDPE 1.00 y 1.50 [mm] de espesor.....	58

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1: Características físicas y mecánicas de geomembranas HDPE.	13
Tabla 3.2: Características físicas y mecánicas geotextiles de protección.....	16
Tabla 3.3: Factor de seguridad global (FS).	19
Tabla 3.4: Factor de modificación por geometría de las partículas (FM_S).....	19
Tabla 3.5: Factor de modificación por densidad del material drenante (FM_{PD}).....	20
Tabla 3.6: Factor de modificación por efecto arco en suelos (FM_A).....	20
Tabla 3.7: Factor de reducción por deformaciones a largo plazo (FR_{CR}).....	21
Tabla 3.8: Factor de reducción por degradación química/biológica a largo plazo (FR_{QBD}).....	21

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1: Características generales de las pilas de lixiviación.....	34
Tabla 5.2: Características de los materiales utilizados.	35
Tabla 5.3: Banda granulométrica del material drenante y protector de la geomembrana.	38
Tabla 5.4: Ensayes de punzonamiento geo-estáticos.	40
Tabla 5.5: Propiedades geomembrana HDPE - Texturizada (GRI - GM 13, año 2011).....	44
Tabla 5.6: Propiedades geomembrana HDPE - Lisa (GRI - GM 13, año 2011).....	45
Tabla 5.7: Propiedades geomembrana LLDPE – Texturizada (GRI - GM 17, año 2011).	46
Tabla 5.8: Programa de ensayos hidrostáticos de corta duración - HDPE.	50
Tabla 5.9: Resultados de ensayos hidrostáticos de corta duración - HDPE.	52
Tabla 5.10: Factores de modificación por geometría de las partículas (FM_S) propuestos.	59

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la actualidad existen principalmente dos procesos para la obtención de metales de minerales extraídos de los yacimientos mineros. Cuando los minerales son de alta ley, el tamaño de éstos es reducido mediante molinos hasta formar una pulpa, la cual es procesada para la posterior extracción de metales mediante diversos procesos metalúrgicos. Por otra parte, cuando los materiales son de baja ley, los metales son extraídos desde las partículas minerales a través de la conformación de pilas de lixiviación.

En el caso de las pilas de lixiviación, el mineral es apilado, posteriormente es regado con una solución ácida, la cual disuelve los minerales por percolación a través de las partículas apiladas.

Un esquema del proceso se presenta en Figura 1.1.

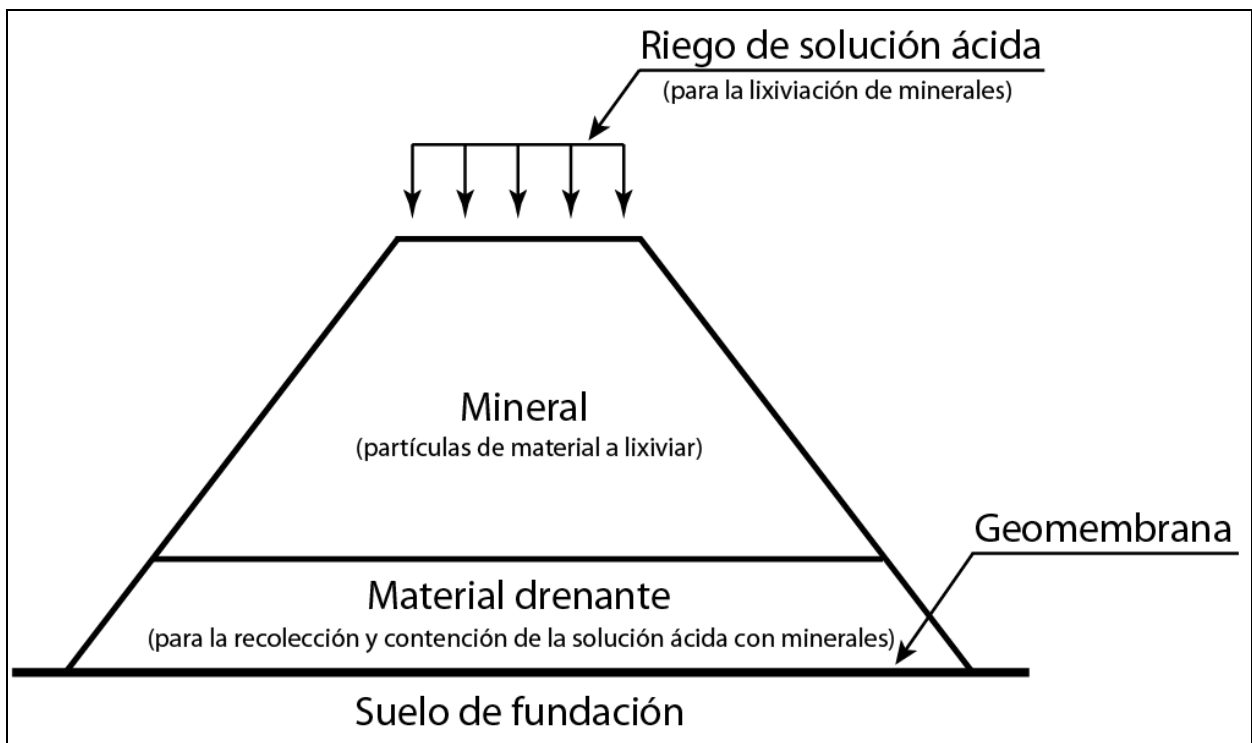


Figura 1.1: Esquema pila de lixiviación.

En la interfaz “material drenante - suelo de fundación”, se instalan geomembranas, las que generan una barrera impermeable entre ambos estratos.

Los objetivos de evitar que la solución ácida infiltre en el suelo de fundación son:

- Evitar que la solución ácida penetre a los suelos naturales y a las napas subterráneas, contaminándolos.

- Evitar la disolución de sales presentes en los suelos salinos, existentes en gran parte del Norte de Chile, lo que podría inducir una reducción en su capacidad de soporte, aumentando su nivel de deformaciones y pudiendo incluso llegar hasta el colapso.
- Evitar la eventual pérdida de solución ácida enriquecida, dado que produciría grandes perjuicios económicos.

La presente investigación se centra en el efecto de punzonamiento que producen las partículas pétreas del material drenante en contacto con la geomembrana, ya que dependiendo de la altura de la pila, se pueden generar grandes concentraciones de tensiones puntuales sobre la geomembrana y su eventual perforación.

En general, el material que compone el suelo de fundación no induce el punzonamiento en la geomembrana. Esto porque suele tener una buena graduación y un tamaño máximo de partículas controlado, además los procesos de compactación y nivelación generan una superficie desde la cual no sobresalen las partículas.

En los casos que el terreno es muy irregular, o el suelo de fundación tiene partículas de gran tamaño, se generan rellenos con material controlado, de este modo se evita que éste pueda inducir el punzonamiento de la geomembrana.

En relación al material drenante, corresponde a un suelo seleccionado con bajo contenido de arenas y finos; de este modo se obtiene una buena permeabilidad para que la solución pueda ser drenada desde la pila. Producto de la selección, se obtiene generalmente un material que corresponde a gravas mal graduadas, por lo que sus partículas podrían sobresalir en el contacto con la geomembrana, induciendo el punzonamiento de ésta.

Para determinar las características generales de los materiales drenantes y geomembranas comúnmente utilizadas en pilas de lixiviación, se cuenta con información proveniente de diversos proyectos que han sido desarrollados en Chile.

A partir de dicha información, se determinan las características generales acerca del diseño de las pilas de lixiviación. A continuación se señalan los parámetros analizados.

- Rango de altura de las pilas
- Rango de altura del estrato de material drenante
- Origen del material drenante

- Clasificación USCS¹ del material drenante
- Características de las geomembranas utilizadas
- Resultados de ensayos de punzonamiento geo-estáticos

Por otra parte, se cuenta con resultados de diversos ensayos ejecutados a geomembranas como parte de su control de calidad durante su elaboración, información que ha sido facilitada por uno de los fabricantes de dichos productos en Chile. Con esta información, se analizan las relaciones existentes entre la resistencia al punzonamiento, con el espesor y el tipo de texturizado de los materiales.

En el presente estudio, se realizan ensayos hidrostáticos para evaluar el comportamiento de geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE)² de 1.0 y 1.5 [mm] de espesor, cuyos resultados se correlacionan con las características del material depositado inmediatamente sobre ella, en particular, con el tamaño máximo y geometría de las partículas de materiales drenantes comúnmente utilizados en la práctica chilena actual.

Para la ejecución de los ensayos, se ha utilizado un equipo que trabaja hasta una presión máxima de 100 [psi]. En la presente investigación se requiere alcanzar presiones mayores, por lo que se desarrollaron modificaciones en el sistema de control del equipo existente, logrando alcanzar presiones de hasta 250 [psi].

Para determinar el tipo de geomembrana requerida en un proyecto, se utilizan metodologías empíricas y expresiones empíricas-teóricas, éstas últimas suelen ser conservadoras, por lo que el objetivo del estudio es proponer modificaciones a las expresiones existentes, en base a los resultados de los ensayos ejecutados y la experiencia lograda en los proyectos realizados en Chile.

¹ USCS corresponde a la sigla en inglés de “Unified Soil Classification System”

² HDPE corresponde a la sigla en inglés de “High Density Polyethylene”

2. ENSAYES DE PUNZONAMIENTO

Producto del gran aumento en el uso de geomembranas en las últimas décadas, se han desarrollado diversas metodologías empíricas para determinar su resistencia al punzonamiento.

A modo de aunar criterios, a continuación se presentan algunos de los procedimientos más utilizados en la actualidad para determinar la resistencia al punzonamiento de las geomembranas. Además, se analizan algunas de las ventajas y desventajas de cada procedimiento.

2.1. ENSAYE GEO-ESTÁTICO

Se utilizan moldes cilíndricos o paralelepípedos, para ello se deposita el material que estará bajo la geomembrana (suelo de fundación) en la parte inferior del molde, con el mismo grado de compactación que tendrá en terreno, y sobre éste se ubica la geomembrana. En la parte superior del molde se deposita el material drenante, con la misma densidad que tendrá en terreno.

Para reproducir el estado de tensiones de terreno, sobre el estrato superior se coloca una placa metálica, en la cual se aplica una carga vertical equivalente a la de terreno. En la Figura 2.1 se muestra el proceso de confección de la probeta, y cómo se aplica la carga vertical mediante un marco de carga.

Para verificar el estado final de la geomembrana, es extraída y se realiza una inspección visual de los daños que se produjeron, en otros casos es introducida en una cámara de vacío, donde se verifica que no existan roturas que no sean visibles mediante la inspección visual.

Mediante este ensaye, se busca reproducir las condiciones de depositación del material y el estado de tensiones al que estará sometida la geomembrana en terreno. Producto de lo anterior, los resultados de este método son representativos de las condiciones existentes en terreno, lo cual representa una de sus principales ventajas.

Por otra parte, para su ejecución se requieren muestras del suelo de fundación y el material drenante, por lo que los plazos para completar los ensayos suelen ser elevados. En forma adicional, si la geomembrana es punzonada, los ensayos deben ser repetidos con geomembranas de otras características, lo que conlleva un aumento en los plazos.

Cabe señalar que en algunos casos se puede sobredimensionar la geomembrana a utilizar para reducir el riesgo que ésta falle durante los ensayos, lo que se traduce en un aumento en los costos del proyecto.

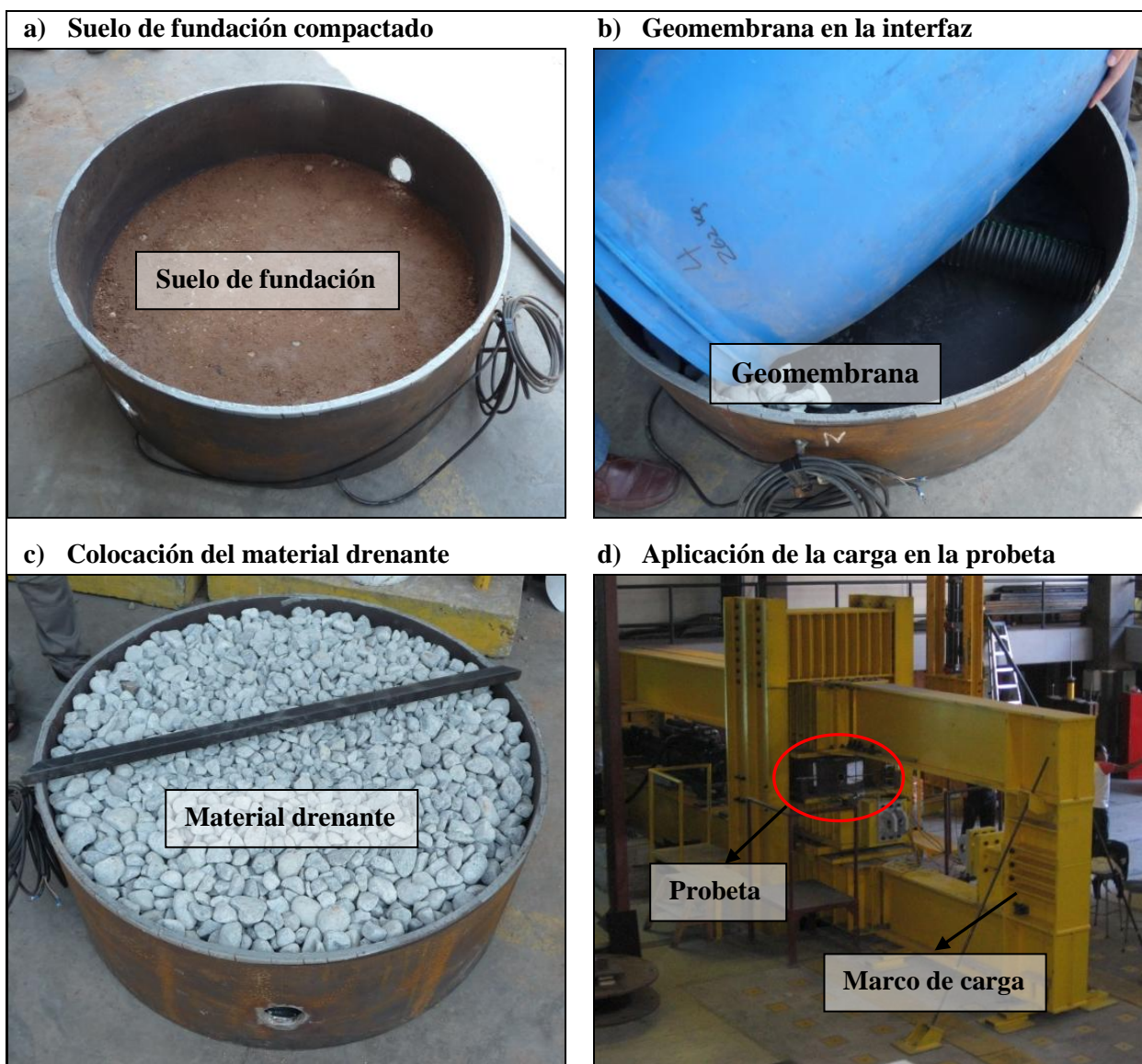


Figura 2.1: Confección de probeta y ejecución de ensaye geo-estático.

2.2. ENSAYE HIDROSTÁTICO CON CONOS TRUNCADOS

Se coloca la geomembrana en un plano horizontal al centro de una cámara cerrada sobre tres conos truncados normalizados, que simulan el material drenante, como se muestra en la Figura 2.2. A continuación, la mitad superior de la cámara es llenada con agua y posteriormente se ingresa aire a presión a través de una válvula ubicada en la parte superior de la probeta, de esta manera, el agua presiona la geomembrana sobre los conos, induciendo su punzonamiento.



Figura 2.2: Esquema de instalación experimental.

El procedimiento del ensaye estándar establece que la presión debe aumentar 7 [kPa] cada 30 minutos, denominándose “ensaye hidrostático de larga duración”. En otros casos, se ha modificado la velocidad con la cual se generan los incrementos de presión, aumentando 1 [kPa] cada 1 minuto, ya que se ha comprobado que no se producen diferencias en los resultados, este procedimiento se ha denominado “ensaye hidrostático de corta duración”.

En la parte superior de los conos truncados existen sensores, que forman parte de un circuito eléctrico que se encuentra abierto. Cuando la geomembrana es punzonada, el agua traspasa hacia la parte inferior de la cámara, cerrando el circuito y activando los sensores, de esta manera se conoce la presión con la que se produjo la rotura de la geomembrana.

La altura expuesta de los conos normalizados es variable, por lo que se generan curvas de presión de falla versus altura de conos.

Para relacionar el material drenante con los conos normalizados, se considera que la altura del cono equivale a la mitad del tamaño máximo de las partículas del material representado, de esta forma se estima la presión de falla.

El objetivo de este método se basa en la estandarización de las condiciones del ensaye, de esta forma, puede ser reproducido fácilmente. Además, se debe realizar sólo una serie de ensayos por geomembrana, sin la necesidad de contar con las muestras de suelo.

Por otra parte, el método no considera la forma y angularidad de las partículas, lo que puede generar grandes diferencias en los resultados. Producto de lo anterior, los resultados no representan necesariamente las condiciones de terreno.

2.3. ENSAYE HIDROSTÁTICO CON PARTÍCULAS AISLADAS

En este ensaye, el equipo, montaje y la aplicación de la carga es idéntica a la del ensaye hidrostático con conos truncados, a diferencia del otro caso, los conos truncados son sustituidos por tres partículas representativas del material drenante.

Al utilizar el material que se tendrá en terreno, se está considerando la geometría del material drenante, por lo que se tiene una representatividad de las condiciones de terreno.

2.4. ENSAYE HIDROSTÁTICO CON PAQUETES DE PARTÍCULAS

Para la realización del ensaye, el equipo y la aplicación de la carga es igual que en el ensaye hidrostático con conos truncados, la diferencia radica en la sustitución de los tres conos por una capa (o estrato) de material drenante. De este modo, se tiene una mayor representatividad de las condiciones de terreno, al igual que el ensaye geo-estático, debido a que ambos simulan de mejor manera las condiciones de terreno, dado que utilizan en forma integra el material que está en contacto con la geomembrana.

Por otra parte, este ensaye no puede ser realizado en todos los equipos, ya que se requiere de grandes presiones para inducir la falla en la geomembrana, las cuales no siempre se pueden alcanzar.

3. ESTADO DEL ARTE

El uso de geomembranas en pilas de lixiviación se remonta a los años 70', previo a esto, la contención de la solución ácida enriquecida se lograba con capas de arcilla compactada en la base de la pila o emplazándolas en sitios con predominio de horizontes arcillosos, con lo que no se lograba la impermeabilización total de ésta.

En otros casos, en que las condiciones de terreno requerían un mayor grado de impermeabilización en la interfaz del material drenante y el suelo de fundación, se utilizaban carpetas de concreto asfáltico.

El desarrollo de pilas de lixiviación a gran escala comienza en Chile en los años 80'. Estos proyectos son llevados a cabo principalmente en el norte del país, zona donde el suelo natural tiene una gran cementación producto del alto contenido de sales, cuya concentración supera en algunos casos el 10%.

A continuación se presentan los antecedentes existentes de los distintos elementos involucrados en la presente investigación.

3.1. PILAS DE LIXIVIACIÓN

Los factores que influyen principalmente en el diseño de las pilas de lixiviación son la ley y tamaño máximo de los minerales, además de las restricciones económicas y los flujos de caja deseados para el proyecto, ya que cada diseño conlleva inversiones y utilidades en plazos distintos.

El diseño más común en Chile corresponde a las pilas de lixiviación estáticas, las cuales se emplazan en áreas que llegan en la actualidad hasta los 20 [km²] y alturas de hasta 200 [m]. En cuanto a los minerales, el tamaño máximo varía desde 2.5 [cm] (1") hasta 100 [cm] (40").

El proceso de lixiviación en estos casos es cercano a un año, una vez finalizado se suele depositar nuevos niveles en la parte superior de la pila, siendo aprovechadas las grandes extensiones de terreno que los depósitos utilizan.

Por otra parte, existen las pilas de lixiviación dinámicas, las cuales en general tienen un área que no supera los 3 [km²], y alturas inferiores a los 10 [m] en la mayoría de los casos. Este proceso productivo consiste en un ciclo continuo de "carga-riego-descarga" de la pila, como se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Imagen pila de lixiviación dinámica¹.

El proceso consiste en depositar minerales en forma continua en el área de la pila, cuando se completa un determinado sector, los minerales son regados con soluciones ácidas por un período de 1 a 2 meses, en la mayoría de los casos. Una vez finalizada la etapa de riego el material es descargado, dejando áreas disponibles para continuar con la deposición de minerales. Este proceso se realiza en forma continua durante varios años.

Posterior al proceso de riego, los ripios lixiviados (mineral ya lixiviado) son llevados a botaderos, en los cuales se podría ejecutar una lixiviación secundaria dependiendo del contenido de minerales remanente.

Independiente del tipo de pila, en la base del depósito (sobre la geomembrana) se ubica un estrato de material con buena permeabilidad (material drenante), que ayuda en el drenaje de la solución ácida desde la pila hasta las tuberías de drenaje. El material suele ser preparado, por lo que además de facilitar el drenaje, ayuda a proteger la geomembrana del punzonamiento.

Finalmente, en el caso de pilas estáticas o depósitos de gran altura, el punzonamiento suele ser inducido por las tensiones verticales del mineral apilado, a diferencia de las pilas dinámicas, en las cuales el punzonamiento en general se produce durante la operación, inducido por la circulación de maquinaria durante el proceso de carga o descarga.

3.2. GEOMEMBRANAS

La geomembrana es un tipo de geosintético, fabricada con polietileno, polipropileno, poli cloruro de vinilo, entre otros materiales. Su función es la de impermeabilizar un determinado sector o estructura

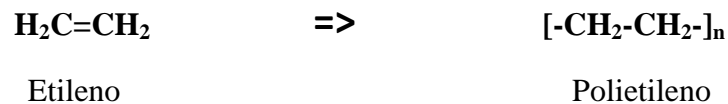
¹ Imagen extraída desde Google Earth.

como es el caso de pilas de lixiviación, piscinas para procesos mineros, lagunas artificiales, depósitos de residuos industriales o domésticos, edificaciones, entre otros.

Los espesores de las geomembranas varían generalmente entre 0.5 y 3.0 [mm], poseen una baja rigidez a la flexión, pero una alta resistencia a la tracción. Su conductividad hidráulica es muy baja, de 1×10^{-11} a 1×10^{-12} [cm/s], por este motivo son ideales para la contención de líquidos.

Junto con el desarrollo de esta tecnología, la industria de los geosintéticos ha variado los materiales utilizados para su fabricación. En la actualidad los materiales más utilizados en Chile para la impermeabilización en la base de los depósitos de minerales son: polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)¹.

El polietileno nace de la polimerización del etileno, que da origen a una estructura molecular lineal del tipo:



El polietileno presentando anteriormente corresponde al HDPE, el cual fue producido en forma industrial por primera vez en el año 1939. Consiste en una cadena lineal de átomos de carbono, y cada uno de estos se enlaza con dos átomos de hidrógeno, como se presenta a continuación.

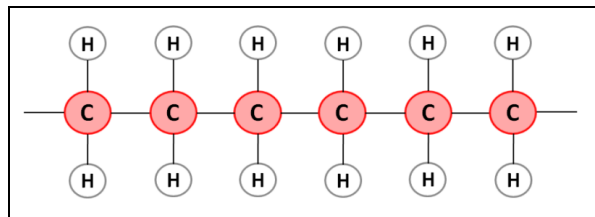


Figura 3.2: Estructura molecular polietileno de alta densidad (HDPE).

Entre los años 1956 y 1959 comenzó la producción de polietileno de baja densidad (LDPE)², el que es producido en condiciones de alta temperatura y presión. Su estructura es similar a la del HDPE, pero algunos átomos de hidrógeno son reemplazados por átomos de carbono, generando largas ramificaciones que nacen desde la cadena principal. Esto produce irregularidades en la estructura, las cuales le proporcionan mayor flexibilidad si se compara con el HDPE.

¹ LLDPE corresponde a la sigla en inglés de “Linear Low Density Polyethylene”

² LDPE corresponde a la sigla en inglés de “Low Density Polyethylene”

Posteriormente, se ha utilizado un comonómero (butano, hexano y octano) en el proceso de polimerización, formando un copolímero. La utilización del comonómero da como resultado ramificaciones muy cortas, generado así un material de baja densidad con una estructura lineal, denominado polietileno lineal de baja densidad (LLDPE).

En la Figura 3.3 se presenta la estructura molecular del LDPE y el LLDPE.

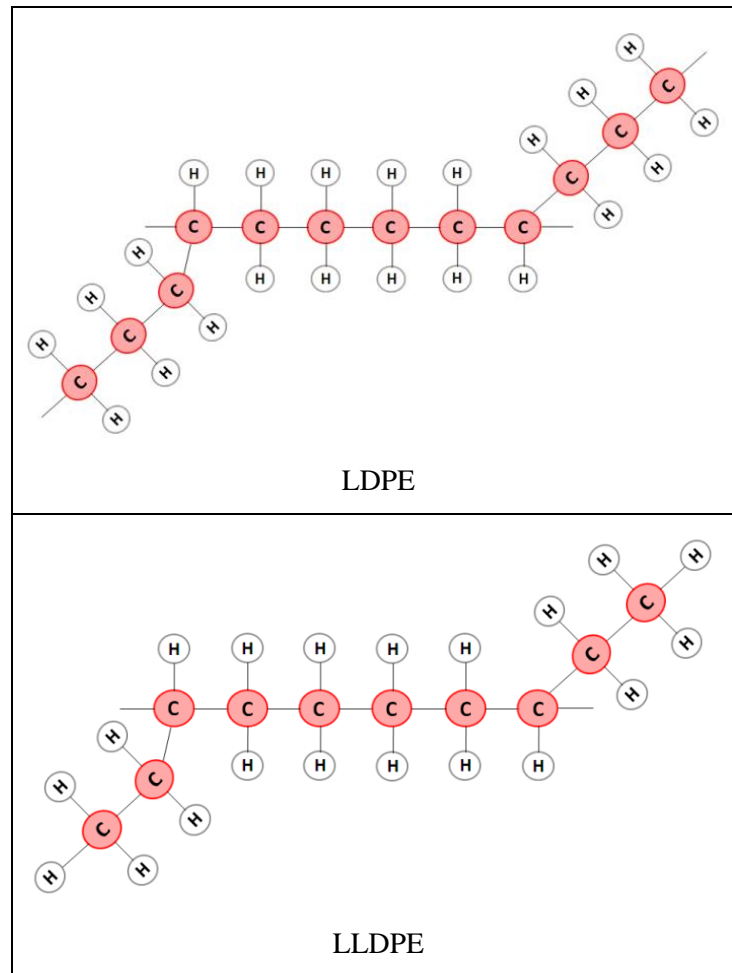


Figura 3.3: Estructura molecular polietileno de baja densidad (LDPE y LLDPE).

Si bien ambos materiales son de baja densidad, las diferencias entre ambos se presentan en sus características mecánicas, ya que el LLDPE al presentar una estructura lineal y regular genera una distribución molecular más estrecha, aumentando su elongación y resistencia al punzonamiento y rasgado.

Por otra parte, en algunos proyectos se utilizan sistemas de impermeabilización y drenaje intermedio, entre las capas de mineral depositado, disminuyendo los volúmenes de solución ácida requerida. Para

estos efectos, en Chile se suelen utilizar geomembranas de poli cloruro de vinilo (PVC)¹, cuyos espesores varían entre 0.3 y 1.0 [mm].

T. D. Stark *et al.* (ref. 1) señalan que en general la formulación del PVC está compuesta por 60 a 65% de resina pura, 30 a 35% de plastificantes, y 0 a 5% de otros aditivos. El alto contenido de plastificantes es necesario para aumentar la flexibilidad de la geomembrana, ya que la resina pura de PVC es muy rígida. En la Figura 3.4 se presenta la estructura molecular del PVC.

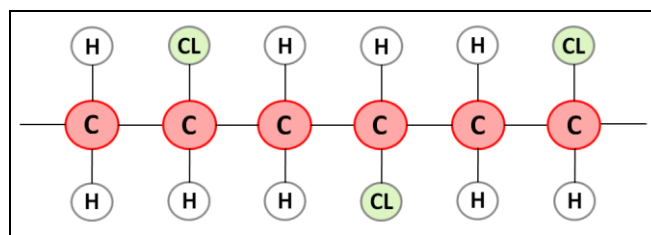


Figura 3.4: Estructura molecular poli cloruro de vinilo (PVC).

La desventaja en el uso de plastificantes en la formulación de las geomembranas de PVC está en la migración de los aditivos en el tiempo, producto de agentes climáticos o por fluidos que se encuentren en contacto con esta, disminuyendo así la flexibilidad de la geomembrana.

Por otra parte, Stark *et al.* (ref. 1) analizan los factores que influyen en la retención de los plastificantes, y plantean recomendaciones para la selección de estos, con el fin de asegurar que no varíen las propiedades físicas y mecánicas de la geomembrana en el tiempo.

3.3. PUNZONAMIENTO EN GEOMEMBRANAS

Distintos métodos empíricos han sido establecidos para evaluar el comportamiento al punzonamiento en geomembranas, algunos son desarrollados desde antes de los años 80´.

A continuación se presentan las expresiones existentes para materiales de HDPE y PVC, en el caso del LLDPE, aún no se han establecido expresiones de diseño.

3.3.1. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

El estudio realizado por Wilson-Fahmy, Narejo y Koerner, “Puncture Protection of Geomembranes”, se basa en el análisis de la resistencia al punzonamiento de geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE).

¹ PVC corresponde a la sigla en inglés de “Polyvinyl Chloride”

Este estudio consta de tres partes, en la primera se analizó la resistencia al punzonamiento mediante un análisis teórico, el cual fue desarrollado por R. F. Wilson-Fahmy *et al.* (ref. 2); la segunda corresponde a ensayos de laboratorio que fueron desarrollados por D. Narejo *et al.* (ref. 3) para determinar la resistencia al punzonamiento en geomembranas; y la tercera, desarrollada por R. M. Koerner *et al.* (ref. 4), quien plantea ejemplos de diseño a partir de los resultados obtenidos de los estudios precedentes.

En la parte experimental se analizaron geomembranas de HDPE de 1.0, 1.5 y 2.0 [mm] de espesor, mediante ensayos hidrostáticos de corta duración, utilizando conos truncados y partículas aisladas.

El objetivo del estudio fue determinar el aumento en la resistencia al punzonamiento en geomembranas, utilizando diversos materiales para protegerla, que fueron colocados entre esta y las partículas. De este modo las partículas no se encuentran en contacto directo con la geomembrana.

A continuación se presentan las características de las geomembranas utilizadas en el estudio.

Tabla 3.1: Características físicas y mecánicas de geomembranas HDPE.

Espesor [mm]	Carga de fluencia [kN/m]	Deformación de fluencia [%]	Resistencia punzonamiento (ASTM D 4833) [N]
2.0	30	18	630
1.5	23	18	440
1.0	14	18	280

Utilizando los tres materiales mencionados anteriormente, se realizaron ensayos hidrostáticos de corta duración, utilizando conos truncados. Los resultados de los ensayos se presentan en la Figura 3.5.

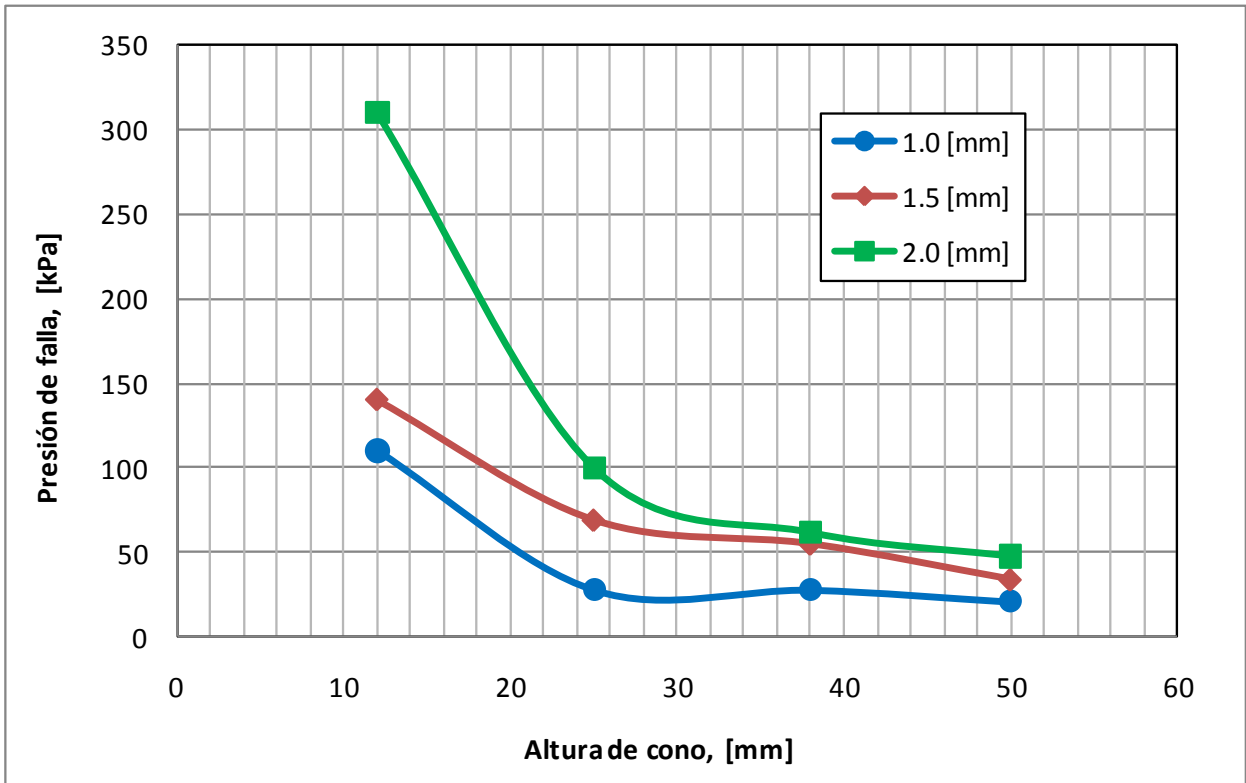


Figura 3.5: Ensayes hidrostáticos con conos truncados, HDPE.

De la Figura 3.5 se observa que la presión de falla decrece con el aumento de la altura de los conos para los tres espesores de membranas ensayadas. Además, la diferencia entre las curvas también disminuye con el aumento en la altura, en particular para un tamaño de 50 [mm] prácticamente no existe diferencia.

Por otra parte, en el caso de la geomembrana de HDPE de 1.5 [mm] de espesor, se realizaron ensayos hidrostáticos de corta duración utilizando partículas aisladas, que tenían formas redondeadas, subredondeadas y angulares. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Figura 3.6.

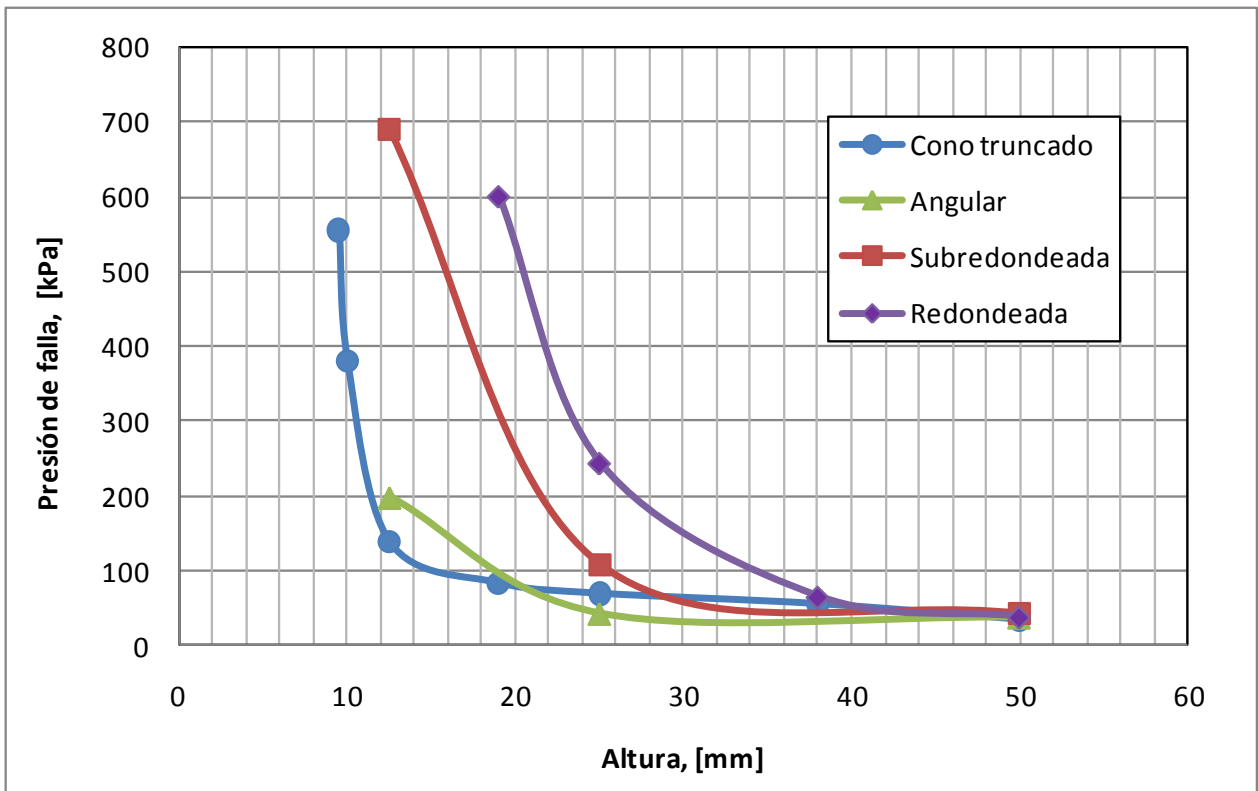


Figura 3.6: Ensayes hidrostático con conos truncados y partículas aisladas, HDPE $e=1.5$ [mm].

En la Figura 3.6 se observa que la presión de falla disminuye al variar la forma de la partícula, desde redondeada hasta angular. Además, todos los ensayos tienden a similar presión de falla para alturas cercanas a los 50 [mm].

Por otra parte, se observa que los resultados del ensaye usando conos truncados son similares a los obtenidos al utilizar partículas aisladas con una geometría angular.

En forma adicional, se realizaron ensayos utilizando geotextiles como elementos protectores de la geomembrana. A continuación se presentan las características físicas y mecánicas de los materiales utilizados.

Tabla 3.2: Características físicas y mecánicas geotextiles de protección.

Material de protección	Masa por unidad de área [g/m ²]	Espesor [mm]	Punzonamiento [kN]
NW-NP-PET-1	130	1.3	0.2
NW-NP-PET-2	270	2.5	0.4
NW-NP-PET-3	550	4.8	0.8
NW-NP-PET-4	1080	9.6	1.5
NW-NP-PP-1	300	3.0	0.5
NW-NP-PP-2	680	5.6	1.1
NW-NP-PP-3	1350	11.0	2.3

Nota: NW: No tejido; NP: Agujado; PET: Poliéster; PP: Polipileno.

Con los geotextiles de la Tabla 3.2 se realizaron ensayos hidrostáticos utilizando conos truncados, mediante los cuales se determina el incremento en la resistencia al punzonamiento en función de la densidad por unidad de área de los geotextiles. Los resultados de los ensayos se presentan en la Figura 3.7.

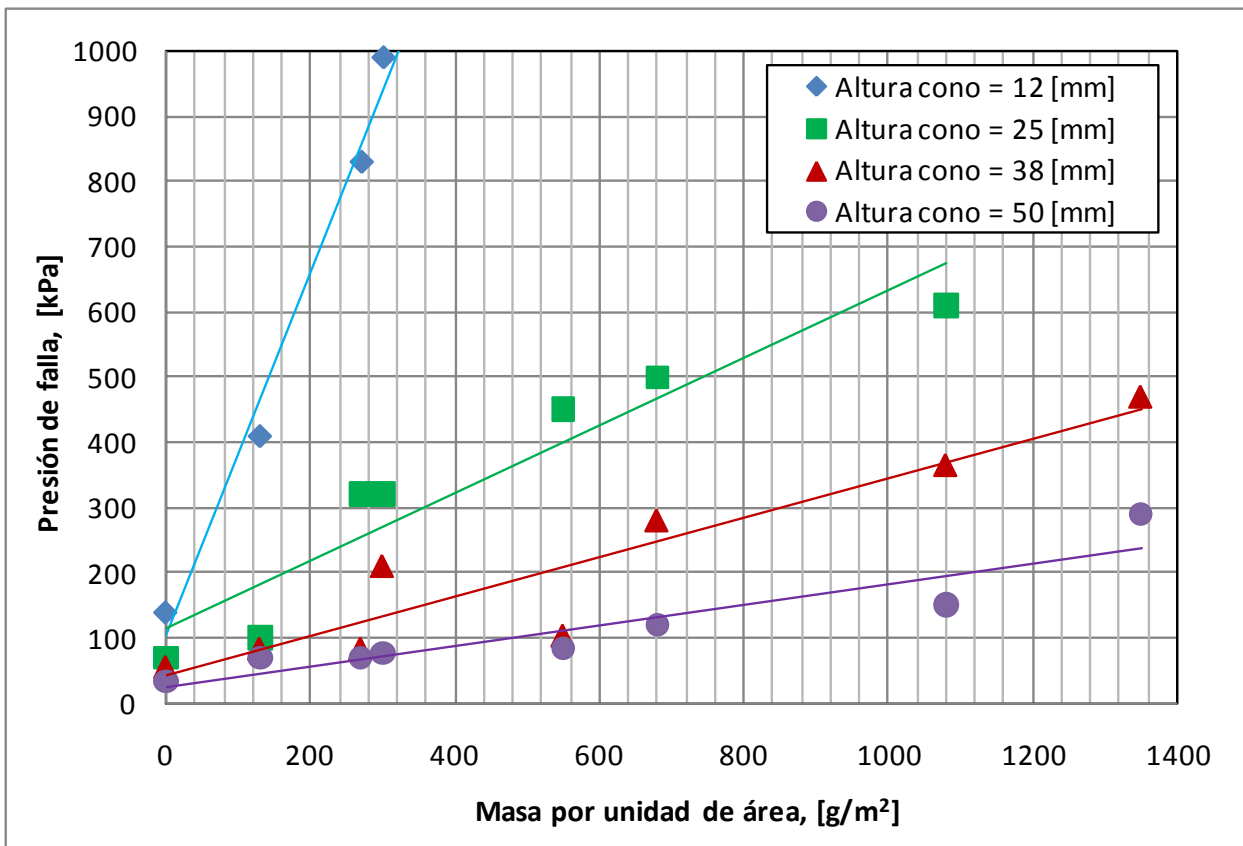


Figura 3.7: Ensayes hidrostático con geotextiles, HDPE de e=1.5 [mm].

En la Figura 3.7 se observa que la presión de falla aumenta linealmente con la densidad por unidad de área de los geotextiles utilizados. Además, en general todos los puntos se ajustan a las líneas de tendencia, por lo que no existirían diferencias entre ambos materiales estudiados, poliéster y polipropileno.

Finalmente, se estudio el efecto de las deformaciones a largo plazo o *creep*. Para ello, se realizaron ensayos hidrostáticos, utilizando conos truncados con y sin elementos protectores para la geomembrana, en los cuales se aplicó una presión máxima del 75%, 50% y 25% de la presión de falla obtenida en los ensayos iniciales, registrándose el tiempo al cual se generó el punzonamiento de la geomembrana.

Los resultados de los ensayos ejecutados sin geotextiles se presentan en la Figura 3.8.

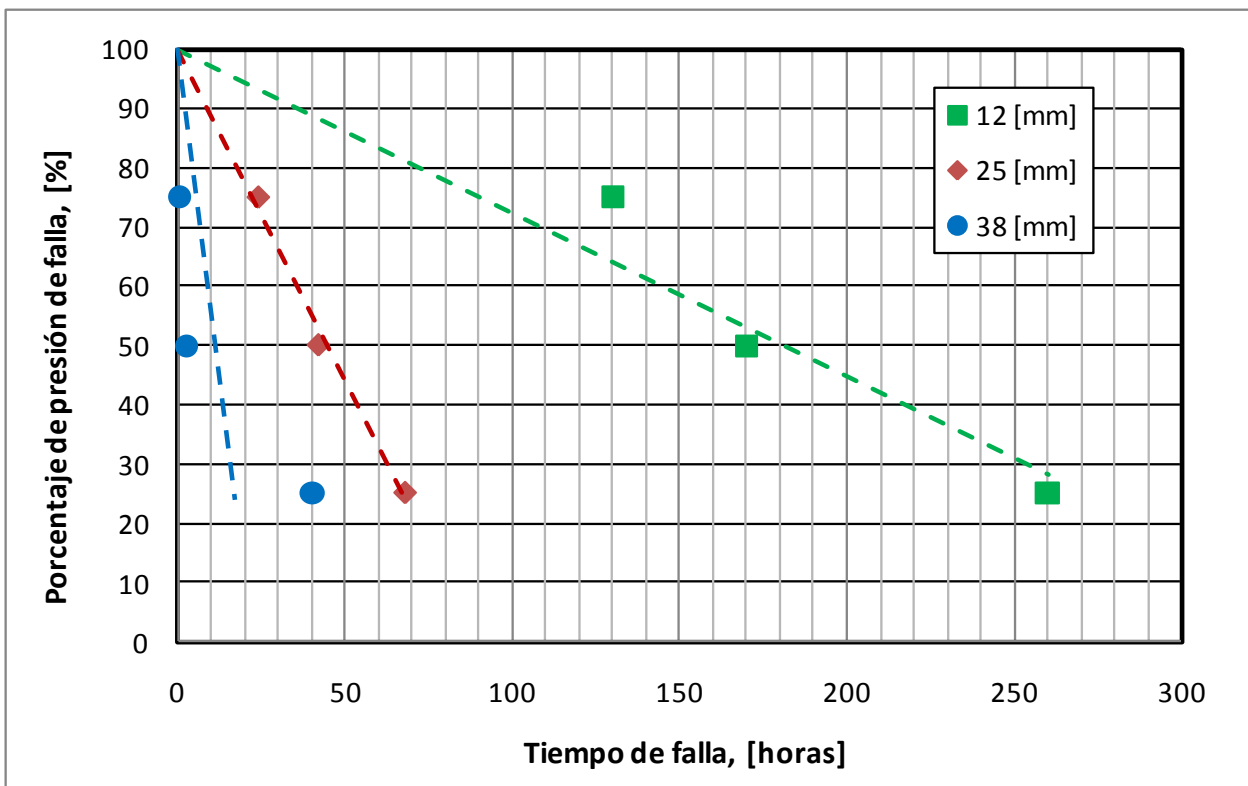


Figura 3.8: Deformaciones a largo plazo o *creep*, HDPE $e=1.5$ [mm].

En la Figura 3.8 se observa que pese a la baja presión aplicada, que en algunos casos fue de sólo un 25% de la presión de falla, se induce el punzonamiento en la geomembrana, lo cual se produce por efectos de las deformaciones bajo presión sostenida a lo largo del tiempo de ensaye.

A partir de todos los resultados presentados anteriormente, se propusieron expresiones de diseño que permiten estimar la resistencia al punzonamiento de geomembranas de HDPE. A continuación se presenta la expresión mediante la cual se calcula el factor de seguridad global, en función de las características del depósito.

$$FS = \frac{P_{adm}}{P_{req}} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

FS = Factor de seguridad global

P_{adm} = Presión admisible de la geomembrana [kPa]

$P_{m\acute{a}x}$ = Presión vertical máxima debida a las solicitaciones del depósito [kPa]

El valor de P_{adm} se obtiene de los resultados de los ensayos de laboratorio, los que son ajustados mediante la siguiente expresión:

$$P_{adm} = \left(50 + 450 \frac{M}{H^2} \right) \left(\frac{1}{FM_S * FM_{PD} * FM_A} \right) \left(\frac{1}{FR_{CR} * FR_{CBD}} \right) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

P_{adm} = Presión admisible [kPa]

M = Masa por unidad de área geotextil de protección [g/m^2]

H = Altura efectiva de la Protuberancia (1/2 tamaño máx. partículas) [mm]

FM_S = Factor de modificación por la geometría de las partículas (*Shape*)

FM_{PD} = Factor de modificación por densidad del relleno (*Packing density*)

FM_A = Factor de modificación por efecto arco en suelos (*Arching*)

FR_{CR} = Factor de reducción por deformaciones a largo plazo (*Creep*)

FR_{CBD} = Factor de reducción por degradación química y biológica (*Chemical/biological degradation*)

De la ecuación 3.2, se desprende que la resistencia de la geomembrana sin elementos de protección ha sido considerada como 50 [kPa], valor que se obtiene para grandes alturas de partículas (Figura 3.6).

A continuación se presentan los valores de los distintos parámetros involucrados, todos han sido actualizados en base a los presentados en estudio realizado por R. M. Koerner *et al.* (ref. 5).

- **Factor de seguridad global (FS):** Tiene por objetivo garantizar la función predominante en el desempeño de la geomembrana, considera las características del suelo de fundación y el material drenante, el cual puede corresponder a una superficie homogénea de partículas agrupadas, o también pudiese ser el caso de partículas aisladas de mayor tamaño que sobresalgan.

Tabla 3.3: Factor de seguridad global (FS).

Tipo de partículas	Altura efectiva de las partículas [mm]	FS (mínimo)
Partículas aisladas	6	3.0
Partículas aisladas	12	4.5
Partículas aisladas	25	7.0
Partículas aisladas	38	10.0
Partículas agrupadas	38 o menos	3.0

- **Factor de modificación por geometría de las partículas (FM_g):** Considera la geometría de las partículas que conforman el material drenante. En la Figura 3.6 se presentó como varía la resistencia al punzonamiento, en función de la geometría de las partículas.

Tabla 3.4: Factor de modificación por geometría de las partículas (FM_g).

Geometría de partículas	FM _g
Angular	1.00
Sub-redondeada	0.50
Redondeada	0.25

- **Factor de modificación por densidad del material drenante (FM_{pd}):** Considera las características del material que será depositado sobre la geomembrana. Corresponde a partículas agrupadas, en la que no existen elementos que sobrepasen en demasía el tamaño al resto del material. Por otro lado, pudiese darse el caso en que existan partículas aisladas de gran tamaño, las que sobresaldrían del estrato, aumentando la probabilidad de que se produzca el punzonamiento de la geomembrana.

Tabla 3.5: Factor de modificación por densidad del material drenante (FM_{PD}).

Características de las partículas	FM_{PD}
Aisladas	1.00
Partículas agrupadas, tamaño máximo 38 [mm]	0.83
Partículas agrupadas, tamaño máximo 25 [mm]	0.67
Partículas agrupadas, tamaño máximo 12 [mm]	0.50

- **Factor de modificación por efecto arco en suelos (FM_A):** Considera que se puede producir el efecto arco en el material mineral que será depositado, modificando el estado de tensiones de hidrostático a geo-estático. Esto porque se ha observado un aumento de seis veces la resistencia al punzonamiento en geomembranas entre ambos ensayos.

Tabla 3.6: Factor de modificación por efecto arco en suelos (FM_A).

Condiciones de carga	FM_A
Hidrostática	1.00
Geo-estático, superficial	0.75
Geo-estático, moderado	0.50
Geo-estático, profundo	0.25

- **Factor de reducción por deformaciones a largo plazos (FR_{CR}):** Considera las deformaciones a largo plazo que se pudiesen producir en las geomembranas, efecto presentado en la Figura 3.8.

Diversos estudios han sido ejecutados con este objetivo, el último, y que considera todos los estudios anteriores fue desarrollado por R. M. Koerner (ref. 5), en el cual se ensayaron materiales HDPE durante 10 años para evaluar el comportamiento de estos.

A partir de lo anterior, en la Tabla 3.7 se presentan los últimos valores propuestos para el factor de reducción por deformaciones a largo plazo.

Tabla 3.7: Factor de reducción por deformaciones a largo plazo (FR_{CR}).

Masa por unidad de área [g/m ²]	Altura efectiva de partículas [mm]		
	38	25	12
Sin geotextil	N/R	N/R	N/R
270	N/R	N/R	N/R
550	N/R	N/R	>1.5
1100	N/R	1.5	1.3
>1100	1.3	1.2	1.1

Nota: N/R: No recomendado.

- **Factor de reducción por degradación química/biológica a largo plazo (FR_{CBD}):** Considera la degradación que pudiesen presentar los materiales sintéticos que conforman el sistema de impermeabilización por efecto del flujo de solución ácida, la cual se encuentra en contacto directo con dichos materiales.

Tabla 3.8: Factor de reducción por degradación química/biológica a largo plazo (FR_{QBD}).

Tipo de lixiviado	FR_{QBD}
Ligero	1.1
Moderado	1.3
Agresivo	1.5

3.3.2. POLICLORURO DE VINILO (PVC)

En el caso del PVC, en estudio realizado por T. D. Stark *et al.* (ref. 7) se ensayaron materiales de PVC de 0.50, 0.75 y 1.00 [mm] de espesor, utilizando conos truncados para determinar así la curva “presión de falla v/s altura de cono”.

La Figura 3.9 presenta los resultados de los ensayos ejecutados. En forma adicional, se han superpuesto los resultados presentados anteriormente para materiales de HDPE con el propósito de compararlos.

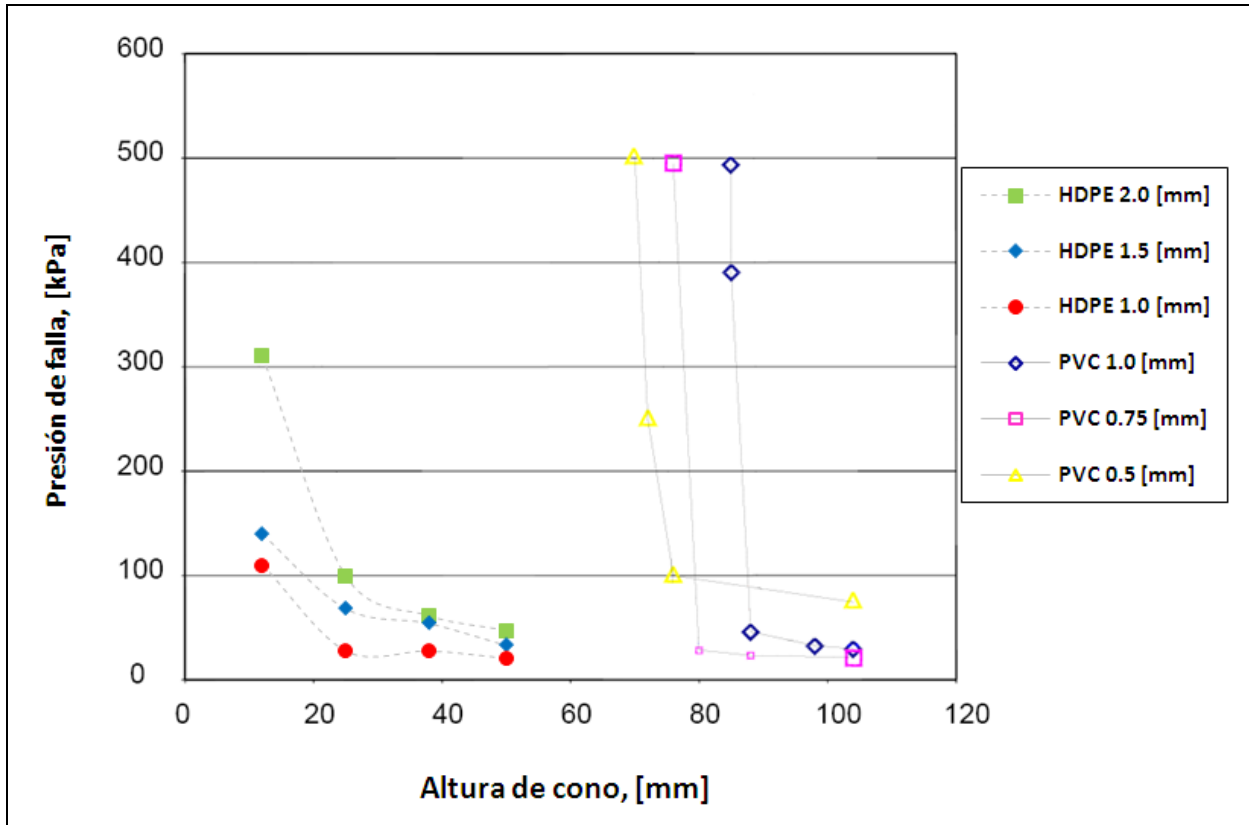


Figura 3.9: Ensayes hidrostáticos con conos truncados, PVC y HDPE.

Se puede observar que el rango de alturas de cono utilizadas en el caso del HDPE es mucho menor que en el caso de PVC, lo que indica la mayor flexibilidad de éste último.

En cuanto a los procedimientos de diseño, se basan en las expresiones establecidas para geomembranas de HDPE con algunas modificaciones que se presentan a continuación.

$$P_{adm} = \left(450 \frac{M}{H^2}\right) \left(\frac{1}{FM_S * FM_{PD} * FM_A * FM_{CCH}}\right) \left(\frac{1}{FR_{CR} * FR_{CBD}}\right) \text{ y } P_{adm} \geq 30 \text{ [kPa]} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

P_{adm} = Presión admisible [kPa]

M = Masa por unidad de área geotextil de protección [g/m²]

H = Altura efectiva de la Protuberancia (1/2 tamaño máx. partículas) [mm]

FM_S = Factor de modificación por la geometría de las partículas (*Shape*)

FM_{PD} = Factor de modificación por densidad del relleno (*Packing density*)

FM_A = Factor de modificación por efecto arco en suelos (*Arching*)

FM_{CCH} = Factor de modificación por altura crítica de cono (*Critical cone height*)

FR_{CR} = Factor de reducción por deformaciones a largo plazo (*Creep*)

FR_{CBD} = Factor de reducción por degradación química y biológica (*Chemical/biological degradation*)

La ecuación 3.3 se basa en la expresión propuesta para materiales de alta densidad. La diferencia se presenta en que no considera la resistencia de la geomembrana para grandes alturas de partículas (30 [kPa] - Figura 3.9), sino que lo establece como valor mínimo.

Por otra parte, la ecuación 3.3 incorpora el nuevo término FM_{CCH} (Factor de modificación por altura crítica de cono). El concepto asociado es que a una determinada altura expuesta de los conos, la geomembrana se deformará y adquirirá completamente la forma del fondo de la cámara de ensayos sin que se genere el punzonamiento de ésta, a pesar de que se siga aumentando la presión.

En la Figura 3.10 se presenta como varía el factor de modifica FM_{CCH} .

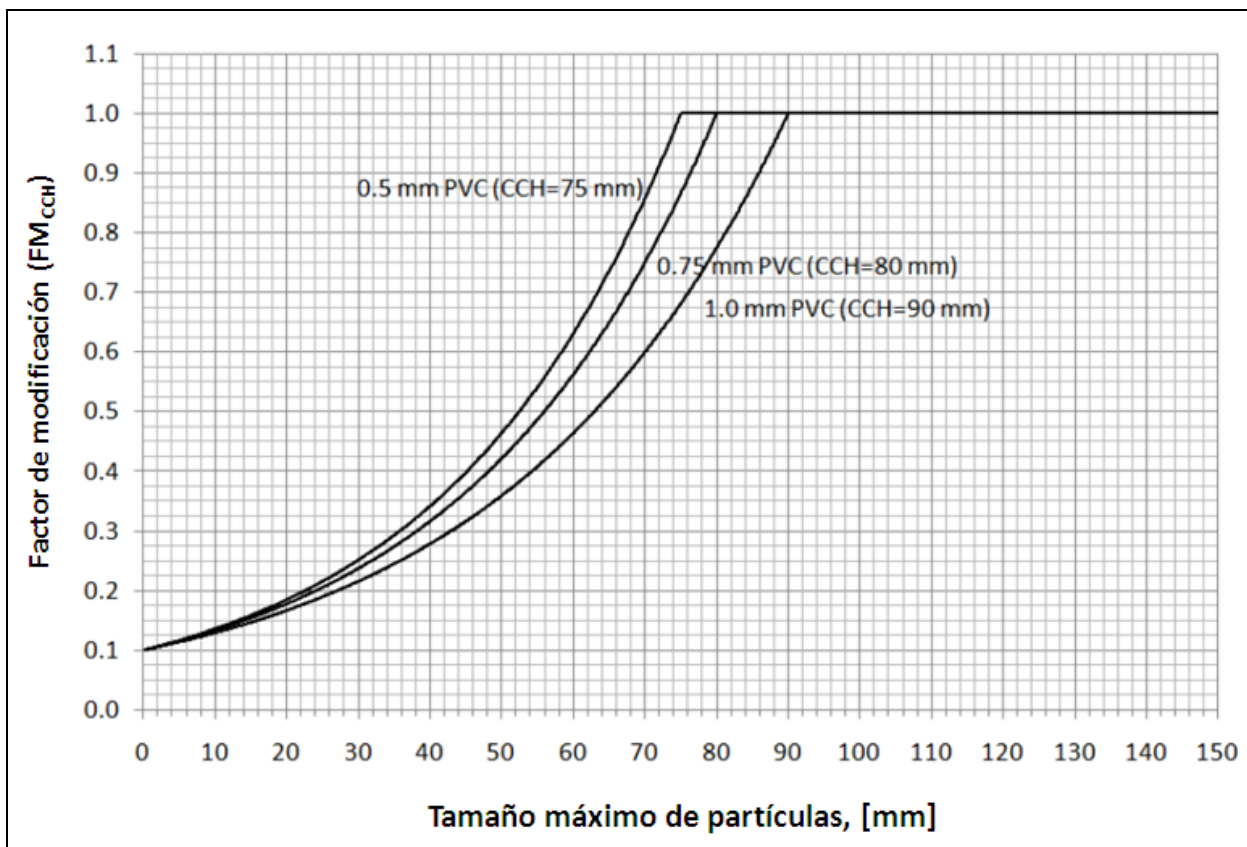


Figura 3.10: Factor de modificación por altura crítica de cono FM_{CCH} .

Se puede observar que el factor de modificación es función del tamaño máximo de las partículas. En los casos que éstas tengan un tamaño menor a la altura crítica de cono, FM_{CCH} toma valores menores a 1, por lo que aumenta la resistencia esperada para la geomembrana.

Respecto al factor de reducción por deformaciones a largo plazo, T. D. Stark *et al.* (ref. 8), indica que los materiales de PVC no sufren deformaciones por *creep*, por lo que este parámetro no se utiliza en el caso de geomembranas sin elementos de protección, no así en el caso de usar geotextiles como elementos de protección, ya que estos materiales si pueden sufrir deformaciones a largo plazo.

Respecto a los otros factores de modificación y reducción, todos mantienen los valores propuestos para materiales de HDPE.

4. EQUIPO PARA DESARROLLO DE ENSAYES

Para el desarrollo del estudio se realizaron ensayos de punzonamiento hidrostáticos, utilizando conos truncados y partículas aisladas. A continuación se describen las características del equipo utilizado y el programa de ensayos llevado a cabo.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO

El ensaye se basa en la norma propuestas por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), en particular en el ensaye “*Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics*” (ASTM D5514) (ref. 9).

Para llevar a cabo el ensaye, la geomembrana es colocada al interior de una cámara cerrada, sobre tres conos truncados, como se muestra en la Figura 4.5. A continuación, por la parte superior de la cámara se ingresa agua y posteriormente aire, de este modo, el incremento en la presión en la parte superior obliga el descenso de la geomembrana, induciendo así el punzonamiento de ésta.

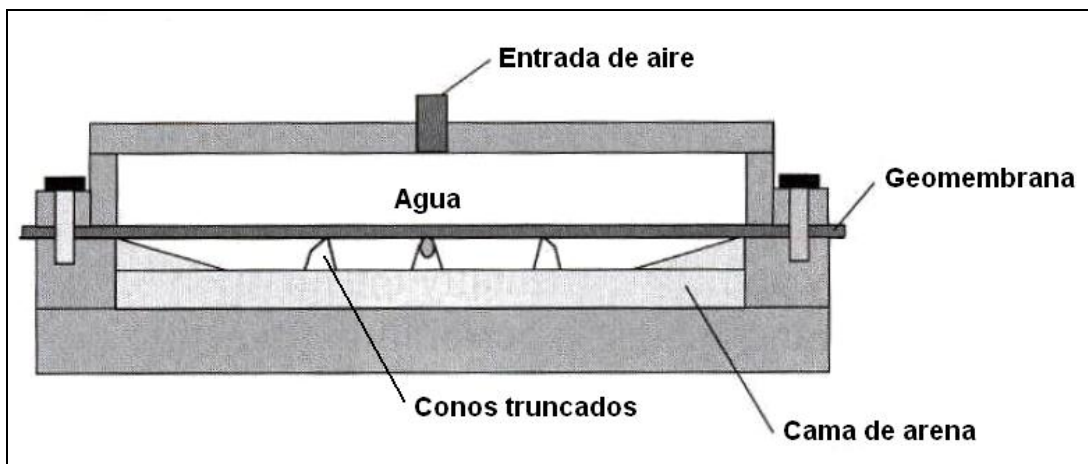


Figura 4.1: Esquema de la instalación de la geomembrana y conos truncados.

El equipo existente para la ejecución de los ensayos consta de un sistema de control electrónico, el cual fue diseñado para trabajar con presiones máximas de 100 [psi], que son logradas mediante un compresor de aire.

En la presente investigación se requiere realizar ensayos con presiones mayores, para así simular las tensiones verticales que inducirían depósitos de minerales de gran altura, como los que se construyen en la actualidad. Producto de lo anterior, fue necesario diseñar un nuevo sistema de control que permitiera trabajar con un rango mayor de presión.

En base a las características de construcción de la cámara, el equipo fue diseñado para trabajar con una presión máxima de 250 [psi], porque presiones mayores podrían inducir fallas en las conexiones y poner en riesgo la integridad física del operador.

En la Figura 4.2 se presenta un completo esquema del equipo.

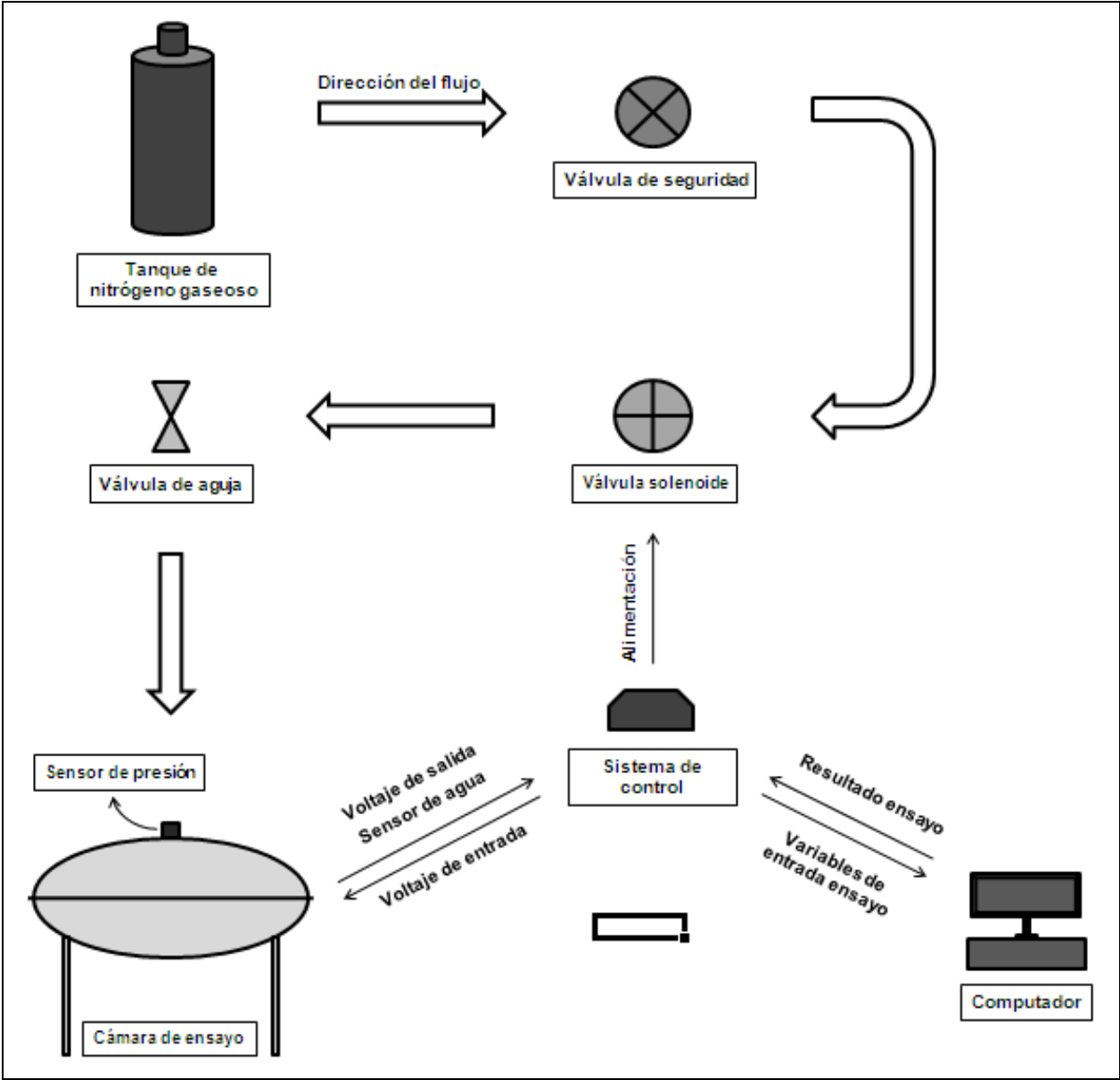


Figura 4.2: Esquema de equipo para el desarrollo de ensayos.

A continuación se describen los distintos elementos que componen el equipo utilizado para la ejecución de los ensayos.

- **Tanque de nitrógeno gaseoso:** Es utilizado para incrementar la presión al interior de la cámara de ensaye, el tanque tiene una presión inicial cercana a los 2700 [psi], la que es controlada mediante un regulador manual ubicado a la salida de éste.
- **Válvula de seguridad:** Se encuentra ubicada a la salida del regulador del tanque de nitrógeno, tiene como objetivo evitar excesos de presión en la línea entre el tanque de nitrógeno y la cámara de ensaye.

Si la presión excede los 250 [psi], presión máxima de trabajo con la cual ha sido diseñado el equipo, la válvula se abrirá y liberará nitrógeno a la atmosfera. Ésta debe ser calibrada manualmente.

- **Válvula solenoide:** Se encuentra ubicada adyacente a la válvula de seguridad, su objetivo es abrir y cerrar rápidamente, de este modo, la presión aumenta en forma lenta y controlada al interior de la cámara.

La válvula es accionada eléctricamente, mediante una bobina que la abre por completo.

- **Válvula de aguja:** Se ubica posterior a la válvula solenoide. Su propósito es controlar el caudal de nitrógeno que pasa desde el tanque hacia la cámara de ensaye, ya que la válvula solenoide se abre completamente, por lo que no es capaz de regular el flujo.
- **Cámara de ensaye:** Es donde se monta la probeta para la ejecución del ensaye, como se muestra en la Figura 4.1. En su interior se coloca la geomembrana sobre los conos truncados, los que finalmente inducirán el punzonamiento en la muestra.
- **Sensor de presión:** Corresponde a un sensor piezoresistivo, el cual varía su resistencia linealmente con la presión generada al interior de la cámara de ensaye.

El sensor se encuentra conectado a un sistema electrónico, el cual le envía el voltaje de alimentación y recibe el de salida, de esta forma se realiza la medición de la presión. En forma adicional, el dispositivo amplifica el voltaje de salida del sensor, enviando dicha información al sistema de control.

- **Sistema de control:** Dispositivo que controla todos los elementos electrónicos que conforman el equipo de ensaye. Corresponde a una plataforma llamada Arduino UNO (Arduino), que tiene como

objetivo la realización de prototipos electrónicos. Ésta posee un microprocesador, el cual es programado en un lenguaje especialmente diseñado para este dispositivo.

El algoritmo cargado en el microprocesador calcula la presión existente en la cámara, en función del voltaje que recibe del amplificador, abriendo y cerrando la válvula solenoide según corresponda. Así envía en tiempo real todas las mediciones de presión del ensaye al computador. El algoritmo se presenta en Anexo A.

Finalmente, mediante el software Termite 2.6 se envían desde el computador hasta el sistema de control los parámetros de entrada del ensaye, velocidad, presión máxima y sensor utilizado. En forma adicional, en este software se recibe la información proveniente del sistema de control.

Si bien la norma indica que los incrementos de presión se deben producir con una velocidad de 1 [psi] cada 30 [min], producto de la fluencia lenta que pudiesen experimentar los materiales, ensayes realizados por D. Narejo *et al.* (ref. 3) con geomembranas HDPE, indican que no existe diferencia al ejecutar los ensayes con incrementos de presión de 1 [psi] cada 1 [min].

Producto de lo anterior, el equipo ha sido programado para trabajar con una tasa de incrementos de presión (o velocidad) de 1 [psi/min]. En la Figura 4.3 se muestra como aumenta la presión en función del tiempo al interior de la cámara de ensayes.

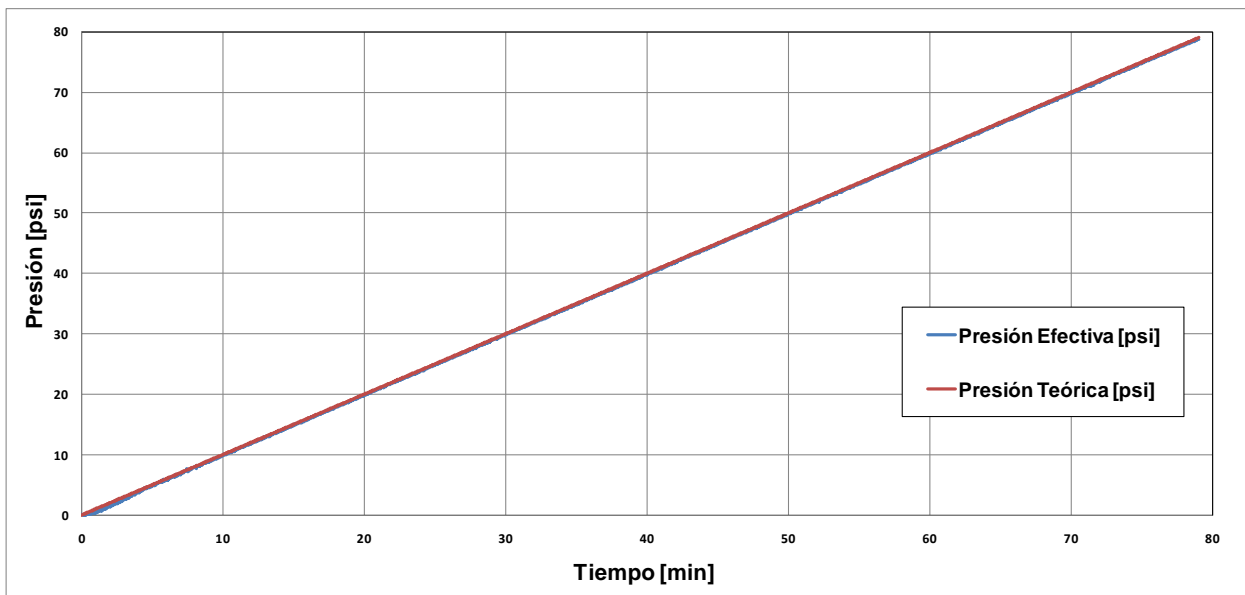


Figura 4.3: Variación de presión en ejecución del ensaye.

La Figura 4.3 muestra que la presión efectiva generada al interior de la cámara de ensaye se ajusta con la presión teórica. En la Figura 4.4 se presenta un detalle de la curva real con la cual varía la presión al interior de la cámara de ensaye.

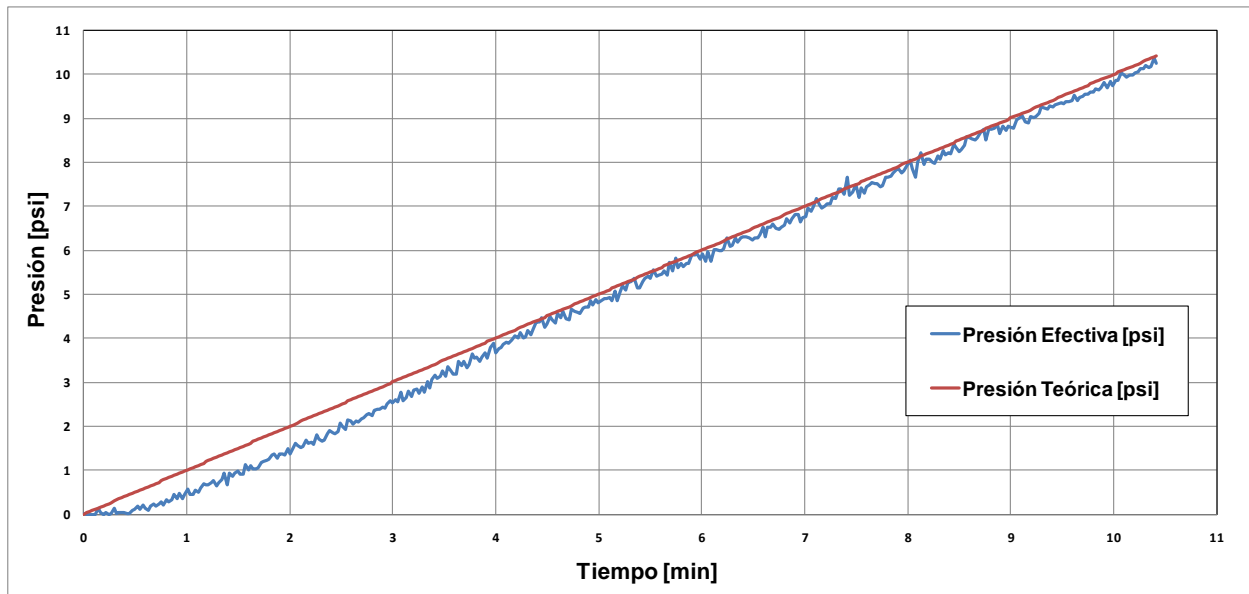


Figura 4.4: Variación de presión en ejecución del ensaye (tramo inicial).

De la Figura 4.4 se observa que en la parte inicial del ensaye la presión efectiva es inferior a la teórica, lo cual se produce porque la geomembrana se está ajustando a la configuración de los conos truncados, por lo que las deformaciones producidas son grandes.

En promedio en los cuatro minutos iniciales la diferencia es aproximadamente de 0.5 [psi], inferior a la precisión establecida en la norma ASTM D5514, la cual es de 1 [psi]. Posterior a las cuatro minutos iniciales, la banda generada por las presión efectiva tiene un rango aproximado de 0.25 [psi].

Producto de lo anterior, se establece que para una velocidad de 1 [psi/min] el equipo cumple satisfactoriamente los requerimientos establecidos. Pese a lo anterior, si bien el algoritmo implementado en el sistema de control permite la realización de ensayos a velocidades inferiores, se podría perder precisión, por lo que se debe verificar al final de cada ensaye que se hayan cumplido los requerimientos en cuanto a la precisión de ± 1 [psi].

Mediante el software Termite 2.6 se configuran los parámetros de entrada, los cuales son: “Velocidad ensaye”, “Presión máxima” y “Sensor”. La “velocidad ensaye” corresponde a la tasa con la cual se incrementa la presión al interior de la cámara de ensaye, ésta aumenta linealmente hasta llegar a la “presión máxima”, luego el equipo ha sido programado para mantener dicha presión en forma constante.

En cuanto a los resultados de los ensayos, estos son almacenados por el software Termite 2.6, desde el cual pueden ser exportados para ser graficados y analizados posteriormente.

4.2. PARTÍCULAS UTILIZADAS EN LOS ENSAYES

Como se ha presentado anteriormente, dentro de la cámara donde se monta el geosintético, y bajo éste, se colocan tres conos truncados generando un triángulo equilátero, los que finalmente inducirán el punzonamiento de la muestra. Un esquema con la ubicación de éstos, y su geometría se presenta en la Figura 4.5.

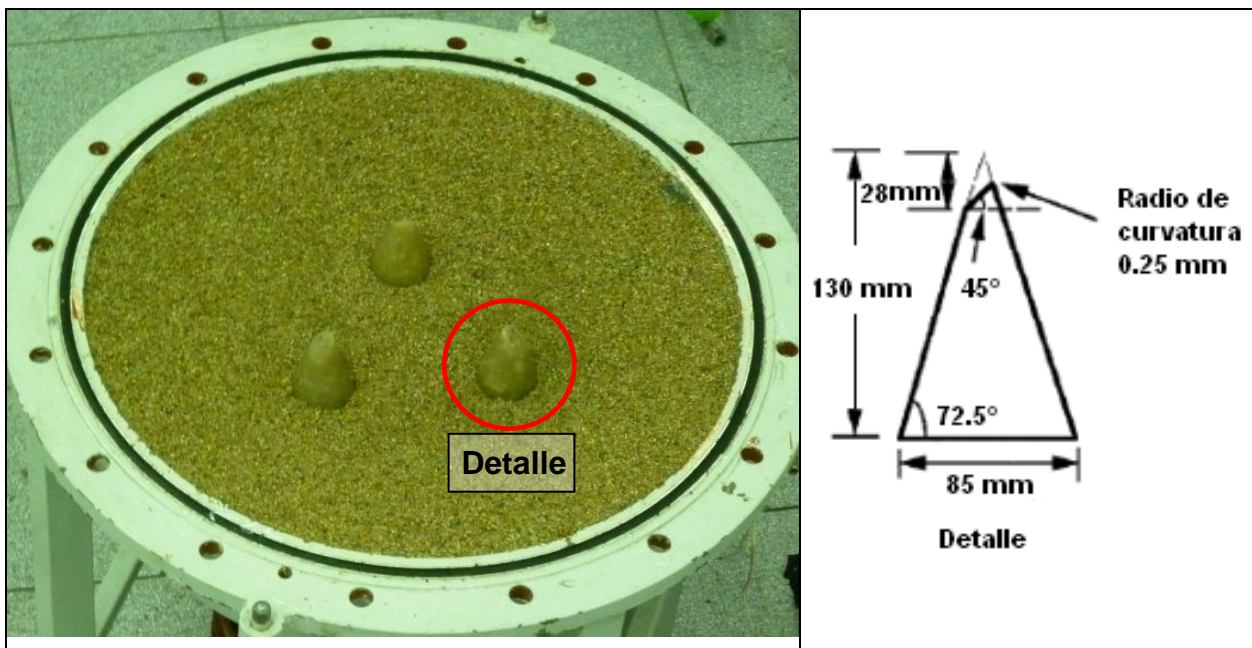


Figura 4.5: Esquema emplazamiento y geometría de conos truncados.

Los conos truncados, son fabricados con un material epóxico de gran resistencia, de este modo su geometría no varía pese a las grandes tensiones hidrostáticas a las cuales puede ser sometido.

Por otra parte, los conos están instrumentados con un sensor de agua, que se ubica en la zona truncada del cono. El sensor de agua consiste en dos cables de cobre que van desde el sistema de control hasta la punta de los conos, en donde están separados por 5 [mm]. Así al generarse el punzonamiento de la geomembrana el agua toca la punta del cono y se cierra el circuito eléctrico, enviando una señal al computador que indica la rotura de la geomembrana.

En la Figura 4.6 se presentan dos imágenes de un cono truncado, la primera de ellas corresponde a una vista en elevación, y la segunda muestra las puntas de los cables que conforman el sensor para la detección de agua.

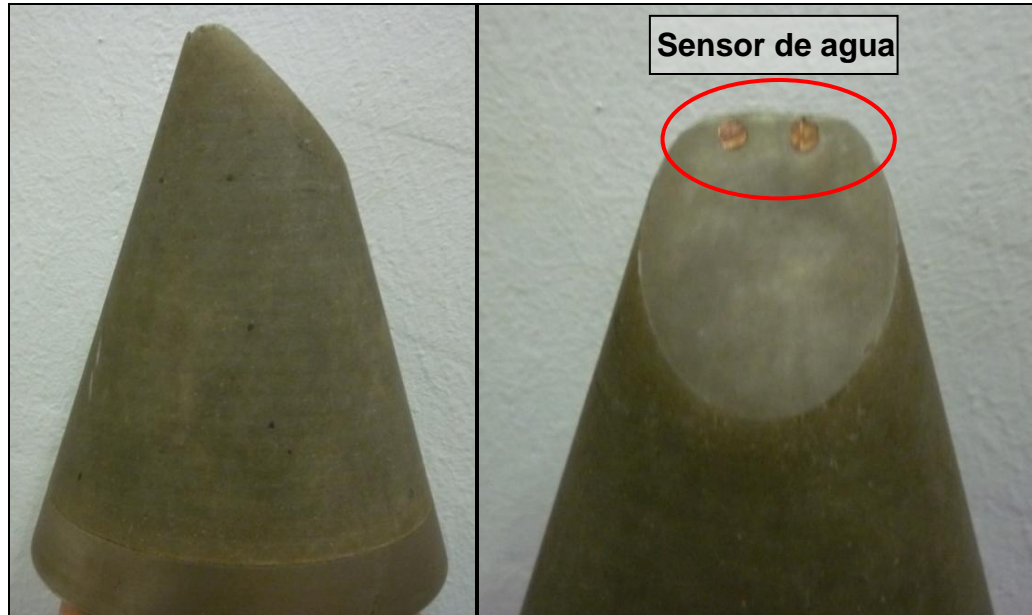


Figura 4.6: Conos truncados y sensor de agua.

La utilización de conos truncados permite la estandarización de las condiciones del ensayo, de este modo estos pueden ser replicados en otro laboratorio, además de permitir la comparación de resultados para la evaluación de distintos materiales.

En la presente investigación se busca correlacionar los resultados estandarizados, mediante la utilización de conos truncados, con ensayos en los cuales se usan partículas reales, a través de lo cual la curva que describe la “presión de falla v/s altura de partículas” para un determinado material no sólo dependerá de la presión y la altura expuesta de los conos, además se considerarán parámetros tales como la esfericidad de las partículas, y redondez de sus cantos.

La esfericidad (S) de las partículas se determina como la relación entre el radio de la máxima esfera inscrita en la partícula ($r_{\text{máx}}$) y el radio de la esfera más pequeña circunscrita en ésta ($r_{\text{mín}}$), de esta manera se tiene la siguiente expresión:

$$S = \frac{r_{\text{máx}}}{r_{\text{mín}}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

La redondez (R) de las partículas, se define como la relación entre el radio de curvatura promedio de la superficie, y el radio de la máxima esfera inscrita en la partícula ($r_{\text{máx}}$), esto mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N} \right)}{r_{\text{mín}}} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

r_i : Radio de curvatura de borde i

N: Número total de bordes

En base a lo anterior, en la Figura 4.7 se presenta un esquema adaptado de Krumbein y Sloss (ref. 10), en el cual se relaciona la esfericidad con la redondez de las partículas. Adicionalmente, se han dividido en cinco categorías, desde angulosas hasta redondeadas, donde las partículas angulosas serían el equivalente a un material chancado, y las partículas redondeadas corresponderían a materiales aluviales, dado que el transporte hidráulico de éste redondea los bordes de las partículas.

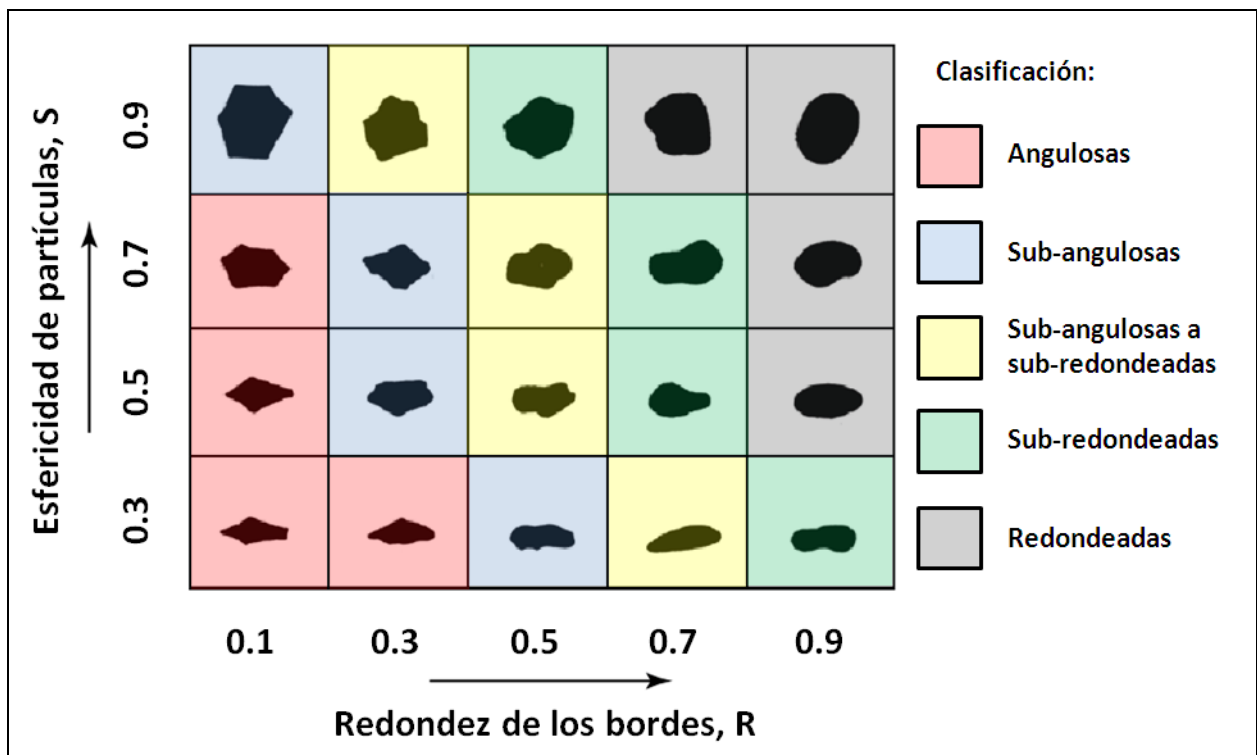


Figura 4.7: Carta de esfericidad y redondez de partículas.

Para la realización de los ensayos se utilizan sólo tres de las categorías antes mencionadas, las cuales se presentan a continuación:

- Angulosas
- Sub-angulosas a sub-redondeadas
- Redondeadas

De esta manera se relaciona la presión de punzonamiento para todo el abanico de partículas que podrían ser utilizadas en contacto directo con los geosintéticos. La geometría de las partículas utilizadas se presenta en la Figura 4.8.

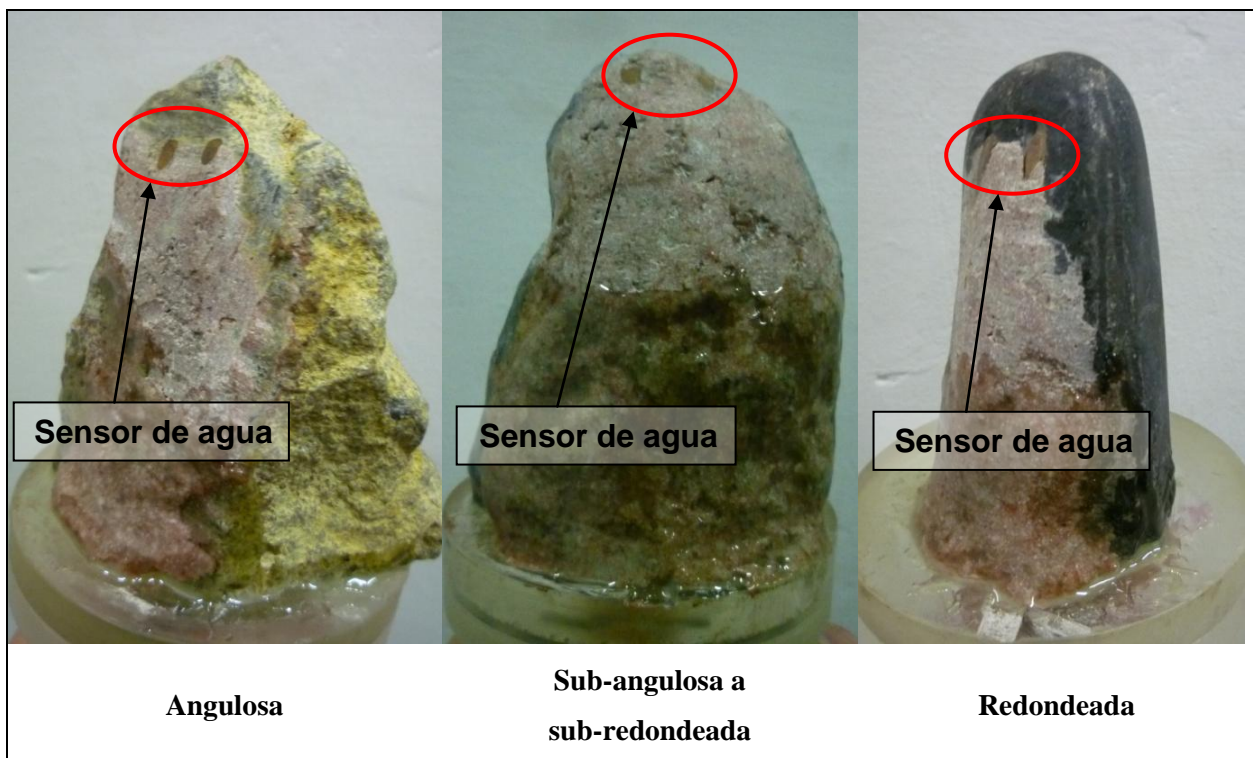


Figura 4.8: Conos truncados y sensor de agua.

Se han confeccionado cuatro partículas para cada tipo de geometría, en la figura anterior se presenta sólo una de las partículas por cada categoría. La totalidad de éstas se muestra en el Anexo B.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados, los cuales fueron descritos en el capítulo anterior. En las secciones 5.1, 5.2 y 5.3 se presentan tablas resúmenes con información de diversos proyectos de pilas de lixiviación, la que ha sido recopilada a partir de proyectos desarrollados en Chile.

Posteriormente, se presentan las características de las geomembranas utilizadas en los ensayos llevados a cabo en la presente investigación, además de los resultados obtenidos de los ensayos de punzonamiento hidrostáticos ejecutados.

5.1. PILAS DE LIXIVIACIÓN

De la información recopilada, en la Tabla 5.1 se presentan 14 proyectos sobre pilas de lixiviación. Se muestran las características generales de los distintos depósitos, tales como la altura de la pila, y tipos de materiales utilizados como drenantes y protectores de la geomembrana basal.

Tabla 5.1: Características generales de las pilas de lixiviación.

Proyecto	Material		Altura pila [m]	Tipo de pila	Espesor material [cm]
	Utilización	Origen			
A	Material drenante y protector geomembrana	Aluvial seleccionado	60	Estática	100
B		Chancado	120	Estática	100
C		-	60	Estática	60
D		Chancado	90	Estática	65
E		-	200	Estática	55
F		Ripios lixiviados	120	Estática	50
G		-	35	Estática	-
H		-	72	Estática	65
I		Partículas angulares	35	Estática	-
J		-	30	Estática	100
K		Ripios lixiviados	80	Estática	100
L		Protector geomembrana	Ripios lixiviados	8	Dinámica
M	Ripios lixiviados		-	Estática	-
N	Ripios lixiviados		100	Estática	-

De la tabla anterior se puede observar que el material utilizado para el sistema de drenaje es en general ripios lixiviados o material chancado, por lo que su geometría suele ser angular y desfavorable en cuanto al punzonamiento de la geomembrana basal.

Producto de lo anterior, en algunos casos se utiliza un estrato adicional de material en la base del depósito, sobre el sistema de impermeabilización, el cual tiene como objetivo sólo proteger la geomembrana del punzonamiento que podría inducir el material drenante por efecto de las cargas verticales.

5.2. MATERIALES GEOTÉCNICOS

A continuación se presentan las características generales de los materiales utilizados en los distintos proyectos analizados, tales como su porcentaje de gravas, arenas y finos, además de la plasticidad de su fracción fina, y su clasificación USCS.

Tabla 5.2: Características de los materiales utilizados.

Proyecto	Muestra	Gravas [%]	Arenas [%]	Finos [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]	Clasificación USCS
A	1	58	39	3	-	-	-	GP
B	1	78	18	5	NP	NP	NP	GP
	2	82	16	3	NP	NP	NP	GP
	3	83	14	3	NP	NP	NP	GP
C	1	85	15	0	-	-	-	GW
	2	100	0	0	-	-	-	GP
D	1	79	18	3	NP	NP	NP	GP
E	1	54	46	0	-	-	-	GP
	2	67	30	3	24	17	7	GW
	3	99	1	0	-	-	-	GP
	4	77	20	4	-	-	-	GW
	5	80	17	3	-	-	-	GW
	6	83	17	0	-	-	-	GP
	7	83	17	0	-	-	-	GW
F	1	78	17	5	20	18	2	GP-GM
	2	73	21	6	23	22	2	GP-GM
G	1	71	26	3	-	-	-	GW
	2	70	27	3	-	-	-	GW
H	1	62	35	3	18	NP	NP	GP
I	1	62	32	6	17.2	17.1	0.1	GW-GM
J	1	76	21	3	-	-	-	GP

Proyecto	Muestra	Gravas [%]	Arenas [%]	Finos [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]	Clasificación USCS
K	1	83	13	4	24	16	8	GW
	2	76	18	6	27	16	11	GP-GC
	3	67	25	8	25	15	10	GP-GC
L	1	48	30	22	29.7	15.3	14.4	GC
M	1	55	32	13	NP	NP	NP	GM
	2	53	36	11	NP	NP	NP	GP-GM
N	1	36	54	10	22.4	16.5	5.9	SP-SC

De la Tabla 5.2 se observa que en varios proyectos se analizó más de una muestra, lo que tiene como objetivo determinar el material que tendrá un mejor desempeño. En otros casos, es necesario estudiar distintas alternativas, ya que el potencial de los empréstitos no es el suficiente para satisfacer los requerimientos del proyecto. El detalle de las curvas granulométricas de todos los materiales se presenta en Anexo C.

En la Figura 5.1 se presentan las curvas granulométricas de los materiales, para las letras A hasta la K, ya que estos han sido preparados para ser utilizados como material drenante y protector de la geomembrana.

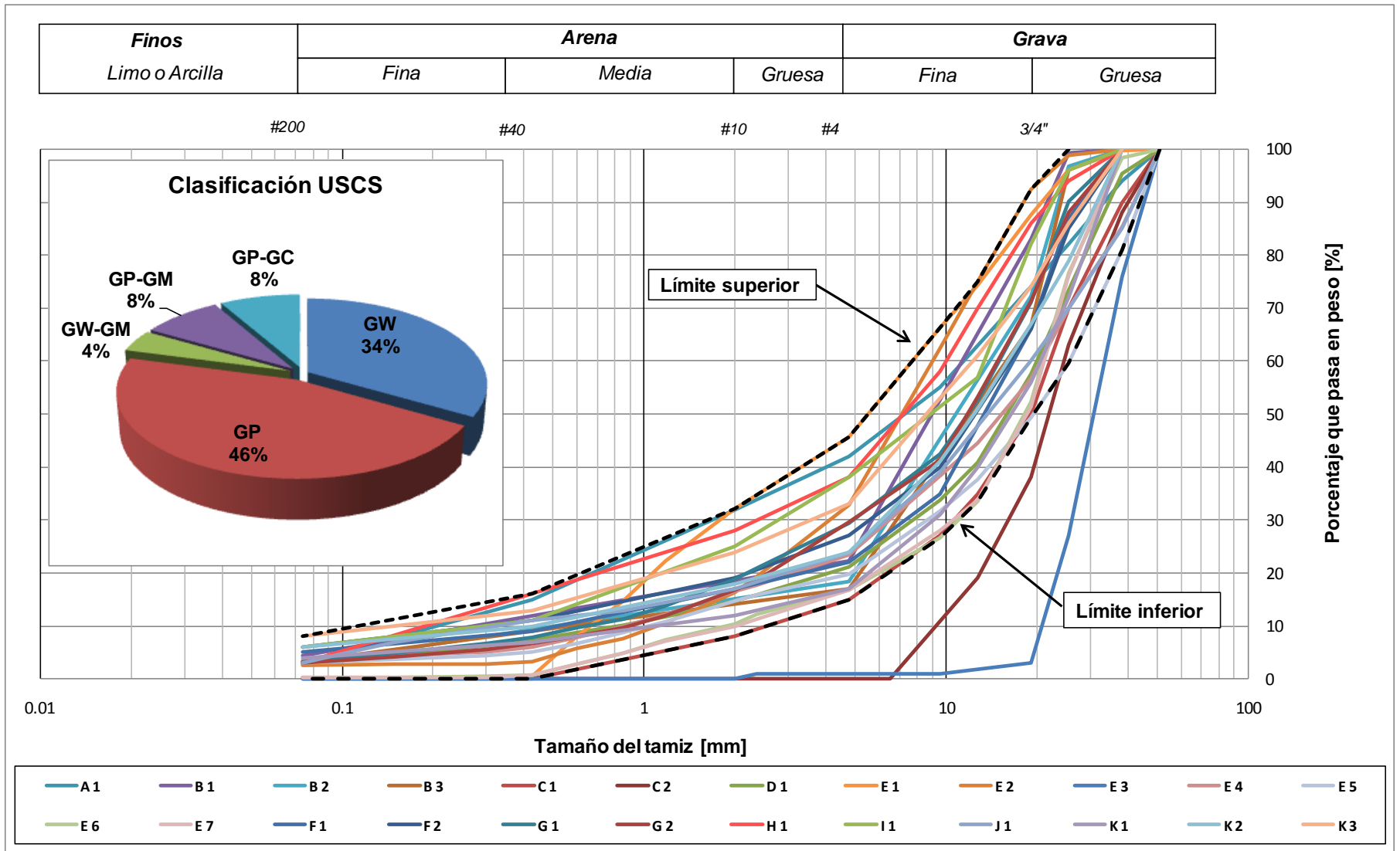


Figura 5.1: Granulometría y clasificación USCS del material drenante y protector de la geomembrana.

De la Figura 5.1 se observa que prácticamente todas las muestras estudiadas en los distintos proyectos se ajustan en una banda granulométrica muy bien definida. Esto se produce porque el material drenante es seleccionado, siendo cortado superiormente en la malla 2" para evitar el punzonamiento de la geomembrana.

Por otra parte, en los casos en que el material tiene un alto contenido de finos, o éstos son plásticos, es cortado inferiormente, de este modo se mejora la permeabilidad del material.

Además, sólo dos de las muestras se alejan de la banda granulométrica, con materiales más gruesos, lo cual mejora su conductividad hidráulica, pero representa una condición más desfavorable para el punzonamiento.

En cuanto a la clasificación USCS de los materiales, se observa que el 80% de las muestras clasifica como grava bien o mal graduada (GW o GP), lo que se condice con el bajo contenido de finos de estos materiales. El 20% restante presenta un mayor contenido de finos, los cuales varían de baja a alta plasticidad, pero en ningún caso superan el 8% del total de cada material analizado.

A continuación, en la Tabla 5.3, se presenta la banda granulométrica, conformada por los materiales que tienen la capacidad de ser drenantes y protectores de la geomembrana.

Tabla 5.3: Banda granulométrica del material drenante y protector de la geomembrana.

Porcentaje que pasa [%]			
Tamiz ASTM	Diámetro [cm]	Límite	
		Superior	Inferior
2"	50.80	100	100
1 1/2"	38.10	100	81
1"	25.40	100	60
3/4"	19.05	92	49
1/2"	12.70	75	34
3/8"	9.53	66	27
#4	4.760	46	15
#10	2.000	32	8
#40	0.425	16	0
#200	0.074	8	0

En relación a los materiales que sólo han sido utilizados como protectores de la geomembrana, sus curvas granulométricas se presentan en la Figura 5.2, en conjunto con la banda granulométrica generada por los materiales anteriormente descritos.

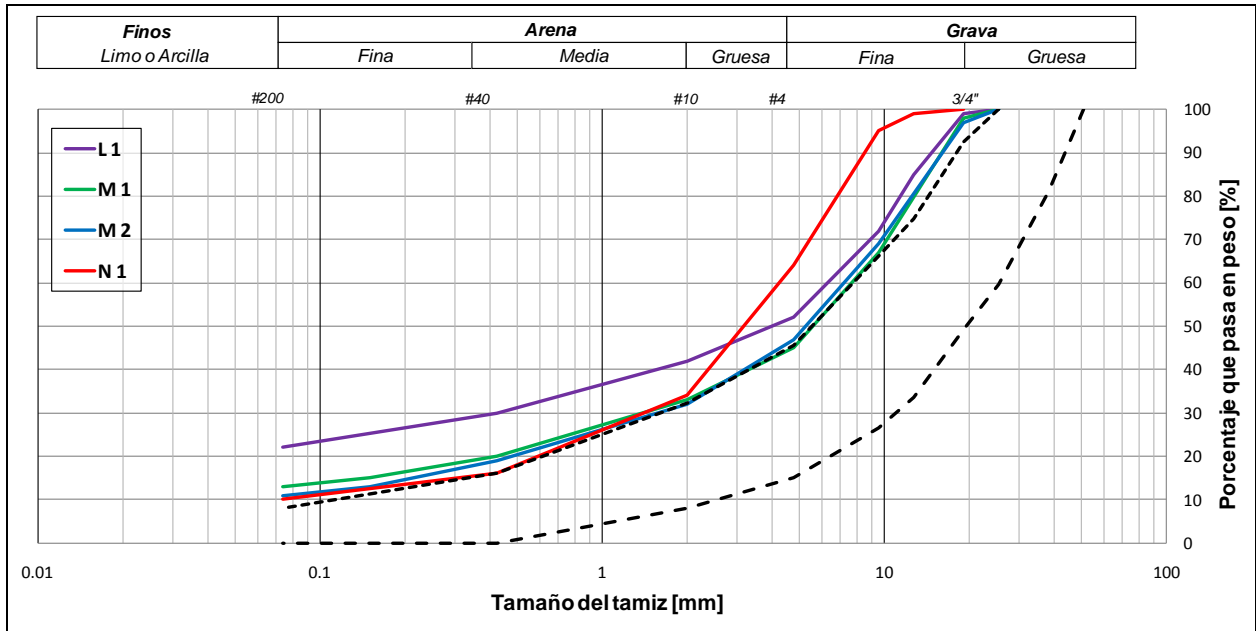


Figura 5.2: Granulometría y clasificación USCS del protector geomembrana.

Se observa que poseen una granulometría más fina, con menor tamaño máximo de partículas y un contenido de finos que varía de 10 a 22%, características que mejoran su desempeño en cuanto al punzonamiento, pero disminuye la permeabilidad de los materiales y así su capacidad para drenar la solución ácida en la base del depósito.

5.3. ENSAYES DE PUNZONAMIENTO GEO-ESTÁTICOS

De la información recopilada, se analizan los ensayos de punzonamiento geo-estáticos realizados en los distintos proyectos. La Tabla 5.4 presenta un cuadro resumen con los resultados de dichos ensayos.

Tabla 5.4: Ensayes de punzonamiento geo-estáticos.

Proyecto	Muestra	Características geomembrana			Ensaye de punzonamiento		
		Tipo	Espesor [mm]	Texturizado*	Tensión vertical [kg/cm ²]	Zonas de fluencia	Punzonamiento
A	1	HDPE	1.5	Simple	20.0	Menor	No
B	1, 2 y 3	LLDPE	2.0	Simple	15.5	Mayor a severo	No
	1, 2 y 3	HDPE	2.0	Simple	15.5	Moderado	No
	1, 2 y 3	HDPE	2.0	Simple	20.4	Moderado a mayor	No
C	1	HDPE	1.5	Simple	13.2	Menor a moderado	No
	1	HDPE	2.5	Simple	15.2	Menor a moderado	No
	2	HDPE	1.5	Simple	13.2	Menor a moderado	No
	2	HDPE	1.5	Simple	16.6	Mayor a severo	No
D	1	HDPE	1.5	Simple	17.0	Menor a moderado	No
E	1	LLDPE	1.5	Simple	36.0	Mayor a severo	No
	1	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Moderado a mayor	No
	2	LLDPE	1.5	Simple	36.0	Severo	Dos perforaciones
	2	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Mayor	No
	3	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Mayor a severo	Una perforación
	4	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Mayor a severo	No
	5	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Severo	No
6	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Moderado	No	
7	LLDPE	2.0	Simple	36.0	Mayor	No	

Proyecto	Muestra	Características geomembrana			Ensaye de punzonamiento		
		Tipo	Espesor [mm]	Texturizado*	Tensión vertical [kg/cm ²]	Zonas de fluencia	Punzonamiento
F	1 y 2	LLDPE	1.5	Simple	21.7	Moderado a mayor	No
	1 y 2	LLDPE	1.5	Simple	26.0	Moderado a mayor	No
G	1	LLDPE	1.5	Simple	8.0	Menor a moderado	No
	2	LLDPE	1.5	Simple	8.0	Menor a moderado	No
I	1	LLDPE	1.5	Simple	18.0	Moderado a mayor	No
J	1	LLDPE	1.5	Simple	5.4	Menor	No
K	1	LLDPE	1.5	Simple	19.0	Menor a moderado	No
	1	LLDPE	2.0	Simple	19.0	Menor	No
	2	LLDPE	1.5	Simple	19.0	Moderado a mayor	No
	2	LLDPE	2.0	Simple	19.0	Moderado	No
	3	LLDPE	1.5	Simple	19.0	Mayor a severo	No
	3	LLDPE	2.0	Simple	19.0	Menor	No
L	1	LLDPE	1.5	Simple	7.3	Menor	No
N	1	LLDPE	1.5	Simple	18.0	Moderado a mayor	No

(*): Texturizado simple: Es por una sola cara, la superficie rugosa es hacia abajo (suelo de fundación).

Se observa que en varios proyectos se han ejecutado más de un ensaye, combinando distintas muestras de suelos con geomembranas, de esta forma se evalúan distintas alternativas que pueden ser utilizadas en un determinado proyecto.

En todos los casos se ensayaron geomembranas texturizadas por una cara, esto porque los diseños de pilas de lixiviación utilizan el lado texturizado hacia el suelo de fundación y el liso hacia el material overliner, de manera que el ángulo de fricción interna en la interfaz “overliner-geomembrana” sea menor que en la interfaz “geomembrana-suelo de fundación”.

El objetivo de tener un menor ángulo de fricción en la cara superior de la geomembrana, es porque si se llegan a producir fallas en bloque, tanto para una condición estática como pseudo-estática, el material overliner deslice sobre la geomembrana, minimizando la posibilidad de que éste arrastre y desgare la geomembrana.

Por otra parte, en sólo 8 de los 32 ensayes ejecutados se han utilizado materiales de HDPE, esto tiene relación con la flexibilidad de cada uno de los materiales, lo cual se abarcará en detalle más adelante.

En cuanto a las zonas de fluencia y el punzonamiento de los materiales, en los ensayes ejecutados con las muestras E-2 y E-3 se generó la rotura de la geomembrana con cargas de 36 [kg/cm²], con partículas de tamaño máximo de 2” (50 [mm] aprox.).

También, en la muestra de HDPE de 1.5 [mm] y el material C-2, la fluencia clasificó como “mayor a severo” para cargas de 16.6 [kg/cm²], en cambio la misma geomembrana con el material A-1 la fluencia fue “menor” para una carga de 20 [kg/cm²], pese a que ambos materiales tienen el mismo tamaño máximo de partículas, lo que indica que el punzonamiento no sólo depende del tamaño máximo, sino que además depende de la graduación del material.

5.4. CARACTERIZACIÓN DE GEOMEMBRANAS

Para garantizar un estándar uniforme de los materiales, el “*Geosynthetic Institute*” (GSI) ha propuesto los criterios mínimos y máximos que deben cumplir cada tipo de geomembrana, en base a su espesor y tipo de texturizado. Además, establece la frecuencia con que deben ser testeados dichos materiales durante su proceso productivo.

A continuación en las Tablas 5.5 y 5.6 se presentan las propiedades mínimas y máximas que deben cumplir las geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE) texturizada y lisa de acuerdo al criterio definido por el GSI en su estándar GRI GM 13. De esta misma forma, en la Tabla 5.7 se presentan las propiedades de las geomembranas de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) texturizadas bajo el estándar de la GRI GM 17. Todos estos materiales han sido testeados en la presente investigación.

Tabla 5.5: Propiedades geomembrana HDPE - Texturizada (GRI - GM 13, año 2011).

Propiedades	Método Ensaye ASTM	Valor del Ensaye							Frecuencia de Ensaye (mín.)
		0.75 mm	1.00 mm	1.25 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	
Espesor (mín. prom.) • El más bajo de 8 de 10 Valores • El más bajo de cualquiera de los 10 valores	D5994	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Cada rollo
Espesor de la rugosidad (mín. prom.) (1)	D 7466	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	Segundo rollo (2)
Densidad (mín. prom.)	D 1505/D 792	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	90,000 kg
Resistencia a la tracción (mín. prom.) (3) • Resistencia de fluencia • Resistencia a la rotura • Elongación de fluencia • Elongación a la rotura	D 6693 Tipo IV	11 kN/m 8 kN/m 12 % 100 %	15 kN/m 10 kN/m 12 % 100 %	18 kN/m 13 kN/m 12 % 100 %	22 kN/m 16 kN/m 12 % 100 %	29 kN/m 21 kN/m 12 % 100 %	37 kN/m 26 kN/m 12 % 100 %	44 kN/m 32 kN/m 12 % 100 %	9,000 kg
Resistencia al desgarro (mín. prom.)	D 1004	93 N	125 N	156 N	187 N	249 N	311 N	347 N	20,000 kg
Resistencia al punzonamiento (mín. prom.)	D 4833	200 N	267 N	333 N	400 N	534 N	667 N	800 N	20,000 kg
Resistencia al agrietamiento (4)	D 5397	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	Por GRI GM10
Contenido de negro de humo (rango)	D 4218 (5)	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	9,000 kg
Dispersión de negro de humo	D 5596	Nota (6)	Nota (6)	Nota (6)	Nota (6)	Nota (6)	Nota (6)	Nota (6)	20,000 kg
Tiempo de inducción del oxidante (OIT) (mín. prom.) (7) (A) OIT estándar — ó — (B) OIT a altas presiones	D 3895 D 5885	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	90,000 kg
Envejecimiento en horno a 85°C (mín. prom.) (7), (8) (a) OIT estándar - retenido tras 90 días — ó — (b) OIT a altas presiones - retenido tras 90 días	D 5721 D 3895 D 5885	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	Por formulación
Resistencia a los rayos UV (mín. prom.) (9) (a) OIT estándar — ó — (b) OIT a altas presiones - retenido tras 1600 hrs (11)	GM11 D 3895 D 5885	N.R. (10) 50%	N.R. (10) 50%	N.R. (10) 50%	N.R. (10) 50%	N.R. (10) 50%	N.R. (10) 50%	N.R. (10) 50%	Por formulación

(1) De las 10 lecturas: 8 deben ser de 0,18 mm mínimo y de 0,13 mm la más baja.

(2) Hay que alternar el lado de la lectura en geomembrana texturizada por ambas caras.

(3) Los valores promedios para ensayos en la dirección de fabricación (MD), y en la dirección perpendicular al de fabricación (XMD) deben ser sobre la base de 5 muestras en cada dirección.

- La elongación de fluencia es calculada utilizando una longitud de la muestra de 33 mm.
- La elongación de rotura es calculada utilizando una longitud de la muestra de 50 mm.

(4) El ensaye SP-NCTL no es apropiado para ensayar las geomembranas con una superficie de textura áspera o irregular. El ensaye se debe realizar en los bordes lisos de geomembrana texturizada, o en una geomembrana lisa e idéntica a la texturizada en cuanto a la resina y los aditivos de la formulación utilizada. La tensión de fluencia utilizada para calcular la carga aplicada en el ensaye SP-NCTL debe ser el valor medio del fabricante a través de los ensayos de MQC.

(5) Otros métodos como el D 1603 ("tube furnace" u horno tipo tubo) o D 6370 (TGA) son aceptables si una apropiada correlación con D 4218 ("muffle furnace" u horno de porcelana) puede ser establecida.

(6) Dispersión de negro de humo (sólo para aglomerados casi esféricos) para 10 vistas distintas:

- 9 en las Categorías 1 o 2, y 1 en la Categoría 3.

(7) El fabricante tiene la opción de seleccionar cualquiera de los métodos OIT listados para evaluar el contenido de antioxidante en la geomembrana.

(8) También es recomendable evaluar las muestras a los 30 y 60 días para compararlas con la respuesta a los 90 días.

(9) La condición del ensaye debe ser en un ciclo de 20 horas expuesto a los rayos UV a 75°C, seguido por 4 horas de condensación a 60°C.

(10) No recomendado, ya que la alta temperatura del ensaye con OIT estándar produce un resultado irreal para algunos de los antioxidantes en muestras expuestas a los rayos UV.

(11) La resistencia a los rayos UV se basa en un valor de porcentaje retenido, independiente del valor original de OIT a altas presiones.

Tabla 5.6: Propiedades geomembrana HDPE - Lisa (GRI - GM 13, año 2011).

Propiedades	Método Ensaye ASTM	Valor del Ensaye							Frecuencia de Ensaye (mín.)
		0.75 mm	1.00 mm	1.25 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	
Espesor (mín. prom.) • El más bajo de cualquiera de los 10 valores	D5199	Nom. -10%	Nom. -10%	Nom. -10%	Nom. -10%	Nom. -10%	Nom. -10%	Nom. -10%	Cada rollo
Densidad (mín.)	D 1505 / D 792	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	0.940 g/cc	90,000 kg
Resistencia a la tracción (mín. prom.) (1) • Resistencia de fluencia • Resistencia a la rotura • Elongación de fluencia • Elongación a la rotura	D 6693 Tipo IV	11 kN/m 20 kN/m 12 % 700 %	15 kN/m 27 kN/m 12 % 700 %	18 kN/m 33 kN/m 12 % 700 %	22 kN/m 40 kN/m 12 % 700 %	29 kN/m 53 kN/m 12 % 700 %	37 kN/m 67 kN/m 12 % 700 %	44 kN/m 80 kN/m 12 % 700 %	9,000 kg
Resistencia al desgarro (mín. prom.)	D 1004	93 N	125 N	156 N	187 N	249 N	311 N	347 N	20,000 kg
Resistencia al punzonamiento (mín. prom.)	D 4833	240 N	320 N	400 N	480 N	640 N	800 N	960 N	20,000 kg
Resistencia al agrietamiento (2)	D 5397 (Apend.)	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	300 hr.	Por GRI GM10
Contenido de negro de humo (rango)	D 4218 (3)	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	9,000 kg
Dispersión de negro de humo	D 5596	Nota (4)	Nota (4)	Nota (4)	Nota (4)	Nota (4)	Nota (4)	Nota (4)	20,000 kg
Tiempo de inducción del oxidante (OIT) (mín. prom.) (5) (A) OIT estándar — ó — (B) OIT a altas presiones	D 3895 D 5885	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	100 mín. 400 mín.	90,000 kg
Envejecimiento en horno a 85°C (mín. prom.) (5), (6) (a) OIT estándar - retenido tras 90 días — ó — (b) OIT a altas presiones - retenido tras 90 días	D 5721 D 3895 D 5885	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	55% 80%	Por formulación
Resistencia a los rayos UV (mín. prom.) (7) (a) OIT estándar — ó — (b) OIT a altas presiones - retenido tras 1600 hrs (9)	D 3895 D 5885	N.R. (8) 50%	N.R. (8) 50%	N.R. (8) 50%	N.R. (8) 50%	N.R. (8) 50%	N.R. (8) 50%	N.R. (8) 50%	Por formulación

(1) Los valores promedios para ensayos en la dirección de fabricación (MD), y en la dirección perpendicular al de fabricación (XMD) deben ser sobre la base de 5 muestras en cada dirección.

- La elongación de fluencia es calculada utilizando una longitud de la muestra de 33 mm.
- La elongación de rotura es calculada utilizando una longitud de la muestra de 50 mm.

(2) La tensión de fluencia utilizada para calcular la carga aplicada en el ensaye SP-NCTL debe ser el valor medio del fabricante a través de los ensayos de MQC.

(3) Otros métodos como el D 1603 ("tube furnace" u horno tipo tubo) o D 6370 (TGA) son aceptables si una apropiada correlación con D 4218 ("muffle furnace" u horno de porcelana) puede ser establecida.

(4) Dispersión de negro de humo (sólo para aglomerados casi esféricos) para 10 vistas distintas:

- 9 en las Categorías 1 o 2, y 1 en la Categoría 3.

(5) El fabricante tiene la opción de seleccionar cualquiera de los métodos OIT listados para evaluar el contenido de antioxidante en la geomembrana.

(6) También es recomendable evaluar las muestras a los 30 y 60 días para compararlas con la respuesta a los 90 días.

(7) La condición del ensaye debe ser en un ciclo de 20 horas expuesto a los rayos UV a 75°C, seguido por 4 horas de condensación a 60°C.

(8) No recomendado, ya que la alta temperatura del ensaye con OIT estándar produce un resultado irreal para algunos de los antioxidantes en muestras expuestas a los rayos UV.

(9) La resistencia a los rayos UV se basa en un valor de porcentaje retenido, independiente del valor original de OIT a altas presiones.

Tabla 5.7: Propiedades geomembrana LLDPE – Texturizada (GRI - GM 17, año 2011).

Propiedades	Método Ensaye ASTM	Valor del Ensaye								Frecuencia de Ensaye (mín.)
		0.50 mm	0.75 mm	1.00 mm	1.25 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	
Espesor (mín. prom.) • El más bajo de 8 de 10 Valores • El más bajo de cualquiera de los 10 valores	D 5994	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Nom. (-5%) -10% -15%	Cada rollo
Espesor de la rugosidad (mín. prom.) (1)	D 7466	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	0.25 mm	Segundo rollo (2)
Densidad (máx.)	D 1505/D 792	0.939 g/cc	0.939 g/cc	0.939 g/cc	0.939 g/cc	0.939 g/cc	0.939 g/cc	0.939 g/cc	0.939 g/cc	90,000 kg
Resistencia a la tracción (mín. prom.) (3) • Resistencia a la rotura • Elongación a la rotura	D 6693 Tipo IV	5 kN/m 250 %	9 kN/m 250 %	11 kN/m 250 %	13 kN/m 250 %	16 kN/m 250 %	21 kN/m 250 %	26 kN/m 250 %	31 kN/m 250 %	9,000 kg
Módulo al 2 % (máx.)	D 5323	210 kN/m	370 kN/m	420 kN/m	520 kN/m	630 kN/m	840 kN/m	1050 kN/m	1260 kN/m	Por formulación
Resistencia al desgarro (mín. prom.)	D 1004	50 N	70 N	100 N	120 N	150 N	200 N	250 N	300 N	20,000 kg
Resistencia al punzonamiento (mín. prom.)	D 4833	100 N	150 N	200 N	250 N	300 N	400 N	500 N	600 N	20,000 kg
Resistencia a la rotura axi-simétrica (mín.)	D 5617	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	Por formulación
Contenido de negro de humo (rango)	D 1603 (4)	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	2.0-3.0 %	20,000 kg
Dispersión de negro de humo	D 5596	Nota (5)	Nota (5)	Nota (5)	Nota (5)	Nota (5)	Nota (5)	Nota (5)	Nota (5)	20,000 kg
Tiempo de inducción del oxidante(OIT) (mín prom)(6) (A) OIT estándar — ó — (B) OIT a altas presiones	D 3895 D 5885	100 400	100 400	100 400	100 400	100 400	100 400	100 400	100 400	90,000 kg
Envejecimiento en horno a 85°C (mín. prom.) (7) (a) OIT estándar - retenido tras 90 días — ó — (b) OIT a altas presiones - retenido tras 90 días	D 5721 D 3895 D 5885	35 % 60 %	35 % 60 %	35 % 60 %	35 % 60 %	35 % 60 %	35 % 60 %	35 % 60 %	35 % 60 %	Por formulación
Resistencia a los rayos UV (mín. prom.) (8) (a) OIT estándar — ó — (b) OIT a altas presiones - retenido tras 1600 hrs (10)	D 3895 D 5885	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	N.R. (9) 35 %	Por formulación

(1) De las 10 lecturas: 8 deben ser de 0,18 mm mínimo y de 0,13 mm la más baja.

(2) Hay que alternar el lado de la lectura en geomembranas texturadas por ambas caras.

(3) Los valores promedios para ensayos en la dirección de fabricación (MD), y en la dirección perpendicular al de fabricación (XMD) deben ser sobre la base de 5 muestras en cada dirección.

• La elongación a la rotura es calculada utilizando una longitud de muestra de 50 mm a 50 mm/min.

(4) Otros métodos como el D 1603 ("tube furnace" u horno tipo tubo) o D 6370 (TGA) son aceptables si una apropiada correlación con D 4218 ("muffle furnace" u horno de porcelana) puede ser establecida.

(5) Dispersión de negro de humo (sólo para aglomerados casi esféricos) para 10 vistas distintas:

• 9 en las Categorías 1 o 2, y 1 en la Categoría 3.

(6) El fabricante tiene la opción de seleccionar cualquiera de los métodos OIT listados para evaluar el contenido de antioxidante en la geomembrana.

(7) También es recomendable evaluar muestras a los 30 y 60 días para compararlas con la respuesta a los 90 días.

(8) La condición del ensaye debe ser en un ciclo de 20 horas expuesto a los rayos UV, a 75°C seguido por 4 horas de condensación a 60°C.

(9) No recomendado, ya que la alta temperatura del ensaye con OIT estándar produce un resultado irreal para algunos de los antioxidantes en muestras expuestas a los rayos UV.

(10) La resistencia a los rayos UV se basa en un valor de porcentaje retenido, independiente del valor original de OIT a altas presiones.

Las geomembranas analizadas han sido proporcionadas por un proveedor internacional que satisface los estándares GRI GM 13 y GM 17. A continuación, en las Figuras 5.3 y 5.4 se presenta la presión de punzonamiento promedio, en función del espesor de las geomembranas, para materiales texturizados de baja y alta densidad, los cuales corresponden a resultados de ensayos de punzonamiento ejecutados mediante el método ASTM D4833 “*Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products*” (ref. 11) como parte de sus procesos de control de calidad.

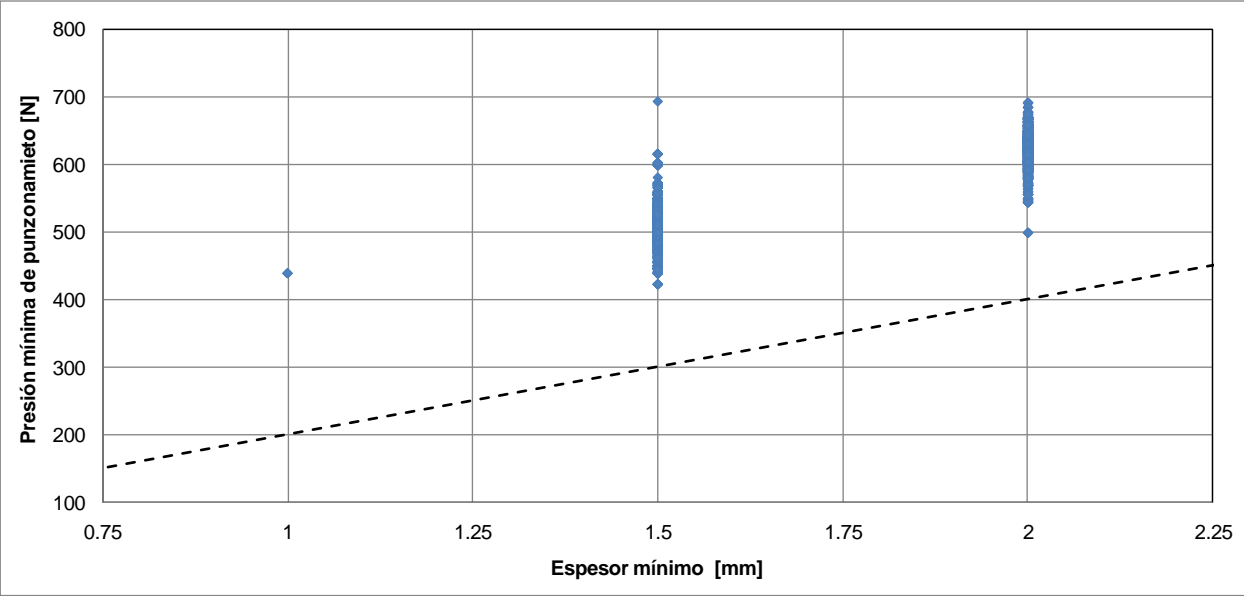


Figura 5.3: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor LLDPE texturizado simple.

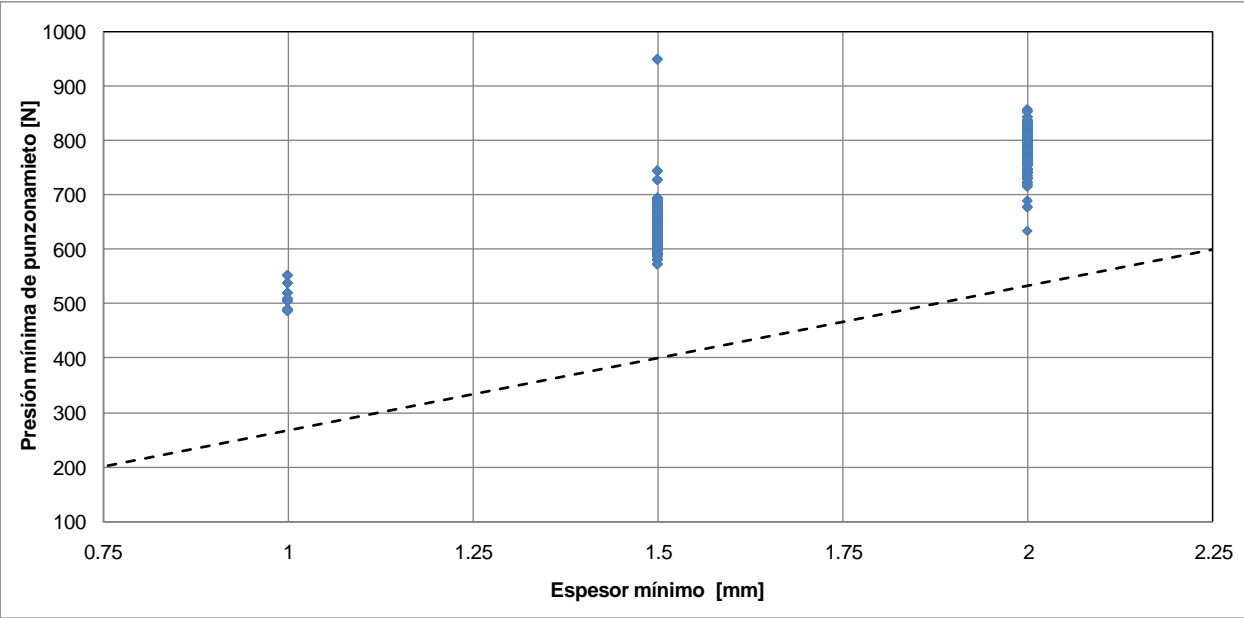


Figura 5.4: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor HDPE texturizado simple.

En los gráficos se presenta en línea punteada los requerimientos mínimos establecidos por el GSI, a través de la GRI-GM 13 y GRI-GM 17, para geomembranas de HDPE y LLDPE respectivamente, presentados anteriormente en las Tablas 5.5 y 5.7.

Se observa que en los ensayos de punzonamiento ejecutados con materiales de baja y alta densidad se sobrepasan con holgura los valores establecidos por las recomendaciones del GSI. Por otra parte, los materiales de alta densidad resisten más que los de baja densidad bajo las condiciones inducidas en el ensaye ASTM D4833, por esto los requerimientos establecidos son mayores para dichos materiales.

A continuación, en la Figura 5.5 se presentan los resultados de los ensayos de punzonamiento por el método ASTM D4833, para geomembranas HDPE lisas por ambas caras.

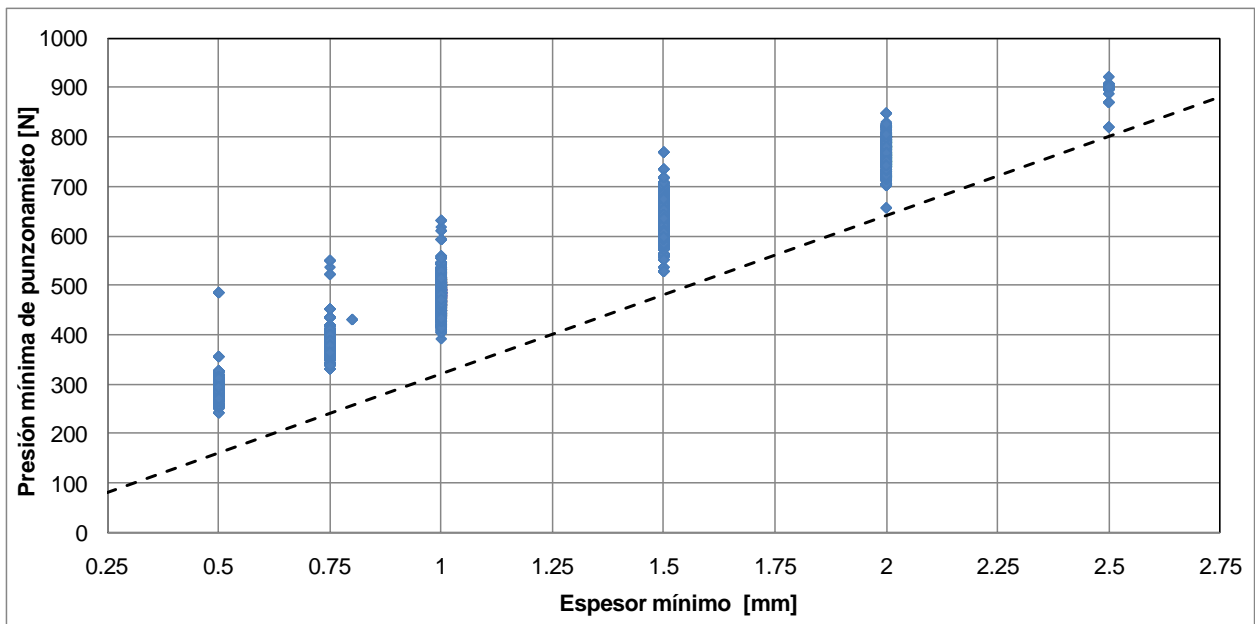


Figura 5.5: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor HDPE lisa.

En este caso, la diferencia entre los resultados de los ensayos y los requerimientos establecidos por el GSI es menor. Esto porque los requerimientos son mayores, ya que el material no ha perdido sección transversal (espesor) producto del texturizado.

En la Figura 5.6 se muestran superpuestos los resultados presentados anteriormente para geomembranas de HDPE lisas por una cara y texturizadas por otra.

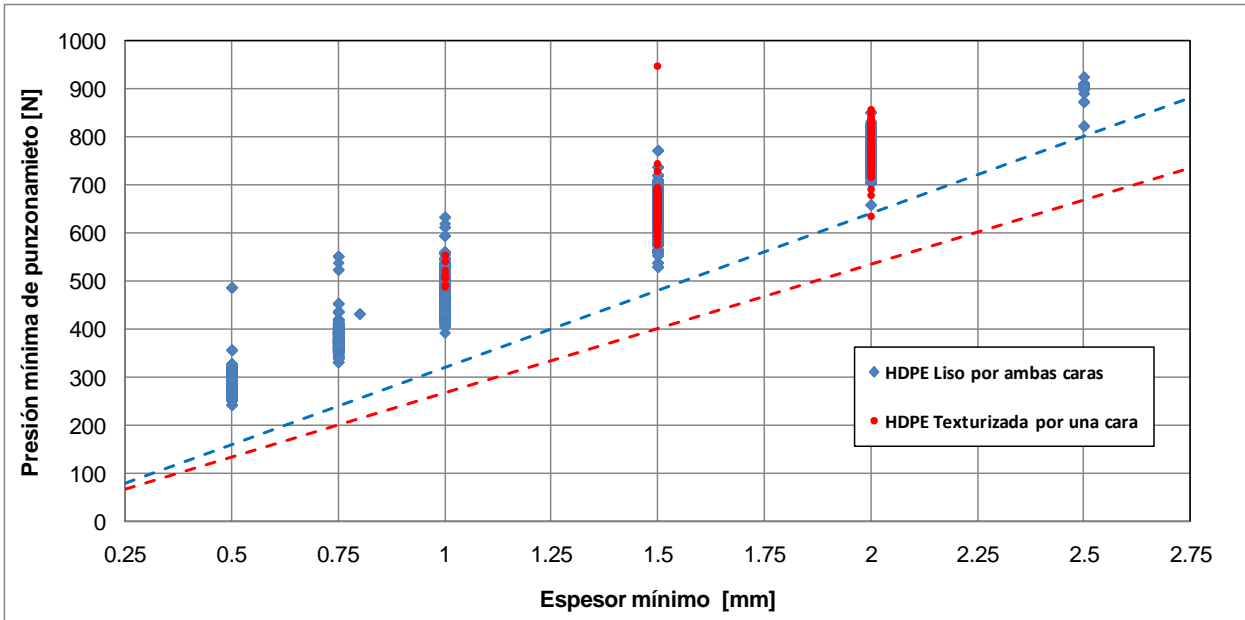


Figura 5.6: Presión de punzonamiento promedio v/s espesor HDPE lisa y texturizada.

Las líneas punteadas, corresponden a los requerimientos establecidos por el GSI en cada uno de los casos. Se observa que existe una gran diferencia en la resistencia establecida por el GSI en ambos casos, pese a que los resultados de los ensayos muestran que prácticamente no existe diferencia en la resistencia al punzonamiento de ambos materiales.

5.5. PROGRAMA DE ENSAYES

Los ensayos de punzonamiento ejecutados han sido realizados mediante el método de punzonamiento hidrostático de corta duración descrito anteriormente.

En la Tabla 5.8 se presenta el programa de ensayos ejecutados, en los cuales se han utilizado conos truncados y las partículas confeccionadas, éstas últimas descritas en la Sección 4.2.

Tabla 5.8: Programa de ensayos hidrostáticos de corta duración - HDPE.

N° ensaye	Geomembrana		Partículas utilizadas	Altura expuesta [mm]
	Textura	Espesor [mm]		
1	T/S	1.0	Conos truncados	25
2	T/S	1.0	Conos truncados	28
3	T/S	1.0	Conos truncados	32
4	T/S	1.0	Conos truncados	38
5	T/S	1.0	Conos truncados	50
6	T/S	1.5	Conos truncados	25
7	T/S	1.5	Conos truncados	32
8	T/S	1.5	Conos truncados	38
9	T/S	1.5	Conos truncados	50
10	L/D	1.5	Conos truncados	28
11	L/D	1.5	Conos truncados	30
12	L/D	1.5	Conos truncados	32
13	L/D	1.5	Conos truncados	38
14	L/D	1.5	Conos truncados	50
15	T/S	1.5	Angulosas	22
16	T/S	1.5	Angulosas	25
17	T/S	1.5	Angulosas	30
18	T/S	1.5	Angulosas	32
19	T/S	1.5	Angulosas	38
20	T/S	1.5	Angulosas	50
21	T/S	1.5	Sub-angular a sub-redondeadas	32
22	T/S	1.5	Sub-angular a sub-redondeadas	38
23	T/S	1.5	Sub-angular a sub-redondeadas	50

Nota: T/S: Texturizado simple (una cara)

L/D: Liso doble (ambas caras)

El programa presentado en la Tabla 5.8 corresponde a los ensayos efectivamente realizados. Se puede observar que se ejecutaron sólo tres ensayos con partículas sub-angulares a sub-redondeadas, y ninguno con partículas redondeadas, esto porque el sistema de control se dañó producto de irregularidades existentes en la red eléctrica de la planta.

En forma adicional, se han realizado ensayos utilizando conos truncados en materiales de baja densidad (LLDPE) para evaluar en forma preliminar su comportamiento.

5.6. RESULTADOS DE LOS ENSAYES

En la Figura 5.7 se muestra el estado final de geomembrana post ensaye de punzonamiento hidrostático. En la imagen superior se muestra una geomembrana lisa por ambas caras en la cual no se produjo la rotura. En la parte inferior se muestra una texturizada por la cara superior, en la cual si produjo el punzonamiento de la muestra.

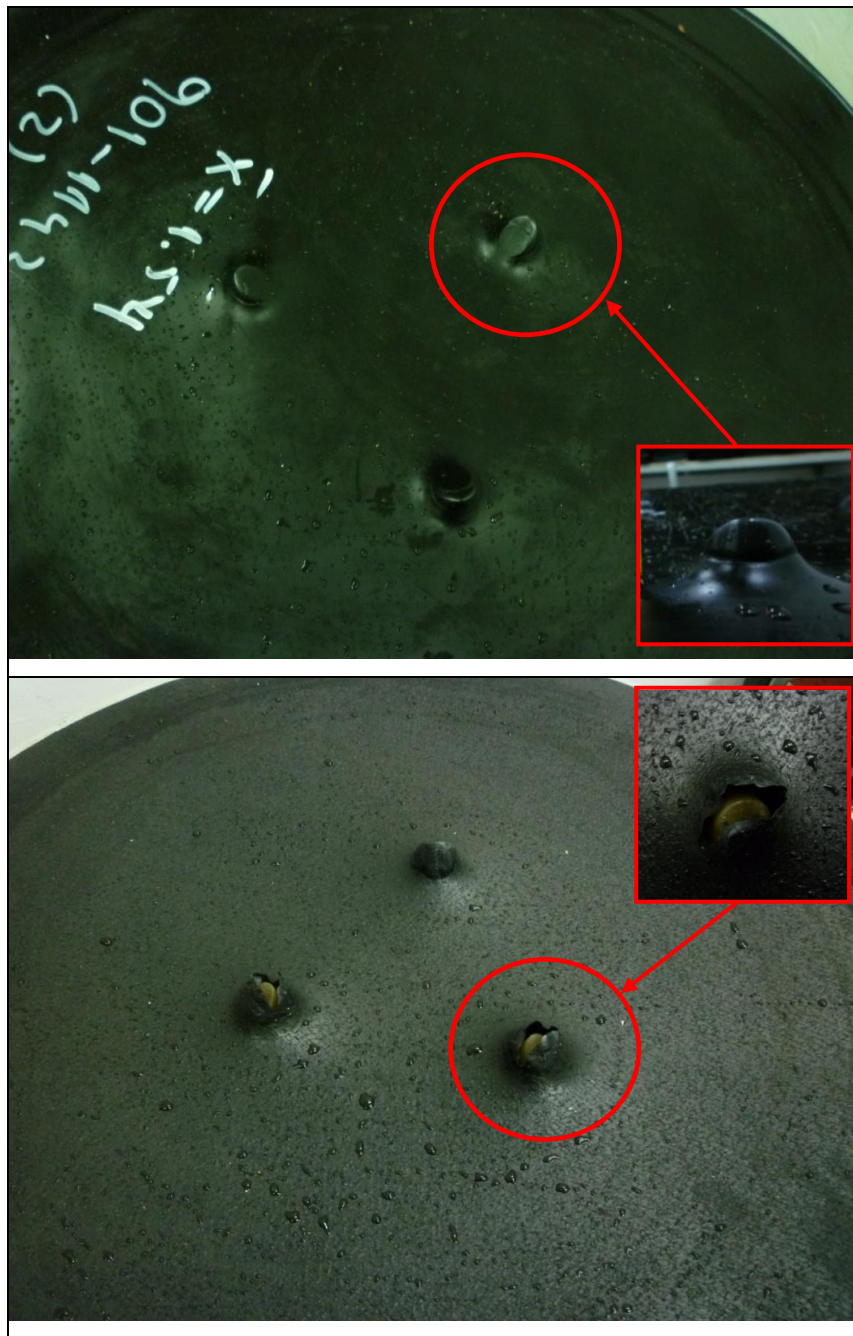


Figura 5.7: Geomembrana post ensaye de punzonamiento.

A continuación se presentan los resultados de todos los ensayos ejecutados, presentados anteriormente en el programa de ensayos de la Tabla 5.8.

Tabla 5.9: Resultados de ensayos hidrostáticos de corta duración - HDPE.

		Presión de falla [kPa]						
Material	Partículas utilizadas	Altura de cono [mm]						
		22	25	28	30	32	38	50
HDPE L/D 1.5	Conos truncados	-	-	>800	437	305	72	43
HDPE T/S 1.5	Conos truncados	-	>1000	-	-	291	55	44
HDPE T/S 1.0	Conos truncados	-	>900	107	-	63	52	30
HDPE T/S 1.5	Angulares	>800	536	-	327	280	43	36
HDPE T/S 1.5	Sub-angulares a sub-redondeadas	-	-	-	-	353	93	46

Nota: T/S: Texturizado simple (una cara)

L/D: Liso doble

En la tabla anterior se indica la resistencia al punzonamiento obtenida de los ensayos de punzonamiento hidrostático. Se puede observar que no en todos los ensayos ejecutados se produjo la rotura de la geomembrana, indicándose la presión máxima obtenida al interior de la cámara de ensaye.

A continuación, se presentan gráficamente los resultados de los ensayos ejecutados con conos truncados, mostrando solamente los puntos en los cuales se produjo el punzonamiento de las geomembranas.

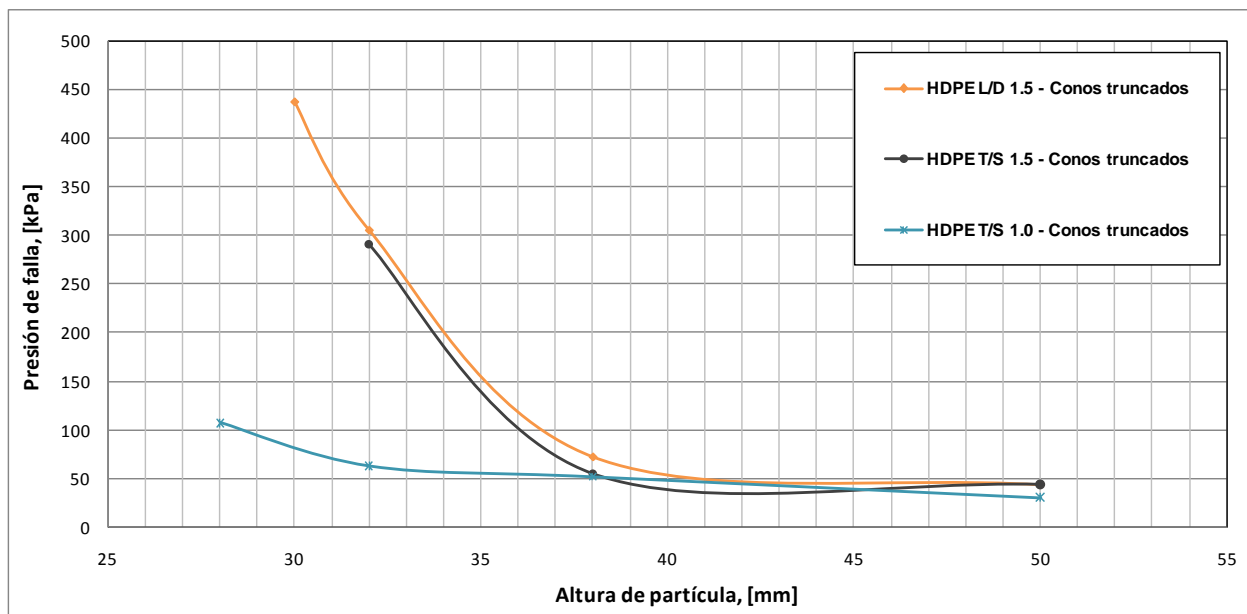


Figura 5.8: Resultados punzonamiento hidrostático HDPE - conos truncados.

En la figura anterior se muestran dos geomembranas de 1.5 [mm] de espesor, una lisa (por ambas caras) y la otra texturizada por una sola cara. Se observa que ambos materiales tienen una tendencia similar, pero con una pequeña diferencia en sus resistencias. Esto coincide con lo establecido por el GSI en cuanto a la resistencia al punzonamiento (ASTM D 4833), ya que para geomembranas lisas los requerimientos son mayores que en el caso de materiales texturizados.

Por otro lado, se presentan los resultados de la muestra de 1.0 [mm] de espesor con una cara texturizada. Se observa que para alturas de cono mayores a 38 [mm] no existe gran diferencia en resistencia con los materiales de mayor espesor, pero no así para alturas menores a 38 [mm], donde la diferencia en la resistencia es mucho mayor.

A continuación se superponen los resultados presentados anteriormente con los antecedentes que se tienen de materiales de alta densidad.

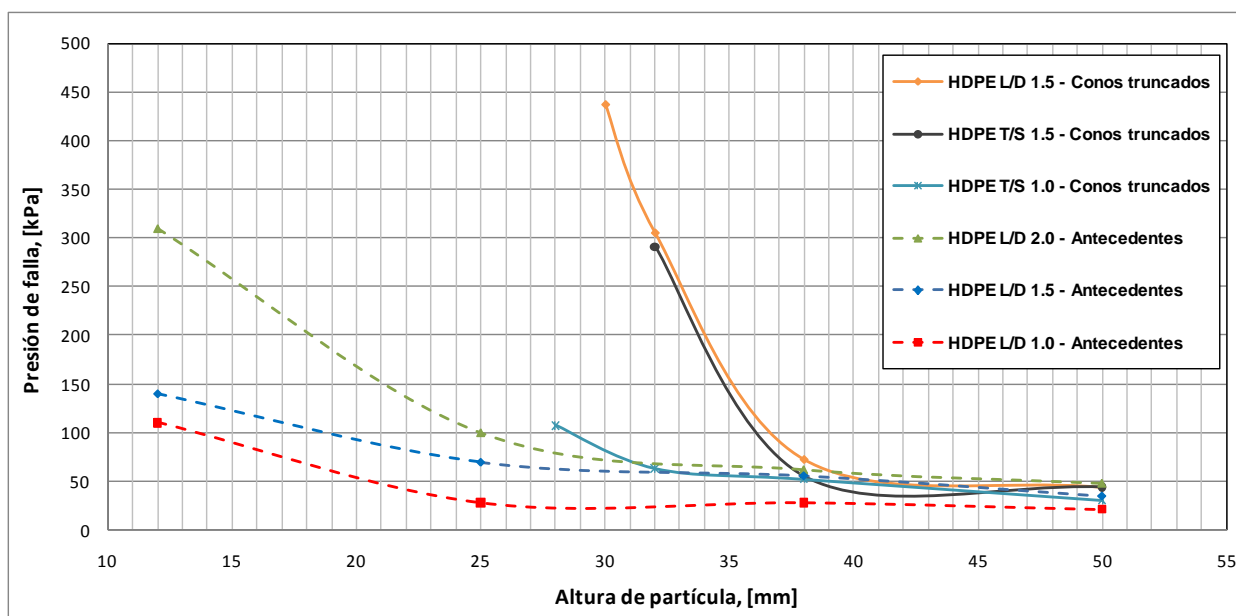


Figura 5.9: Antecedentes y resultados punzonamiento hidrostático HDPE - conos truncados.

De la figura anterior se observa un desplazamiento corrimiento hacia la derecha de las curvas obtenidas para materiales de 1.0 y 1.5 [mm] de espesor, aumentando en gran medida la resistencia al punzonamiento de los materiales que se fabrican en la actualidad a diferencia de los producidos durante los 90´.

De lo anterior se desprende que los materiales hoy en día son mucho más flexibles, esto va de la mano con las mejoras en las tecnologías utilizadas y en la calidad de las materias primas utilizadas en los procesos de producción.

A continuación, en la Figura 5.10 se presentan los resultados de los ensayos ejecutados con conos truncados y las partículas confeccionadas para la presente investigación, “angulares” y “sub-angulares a sub-redondeadas”.

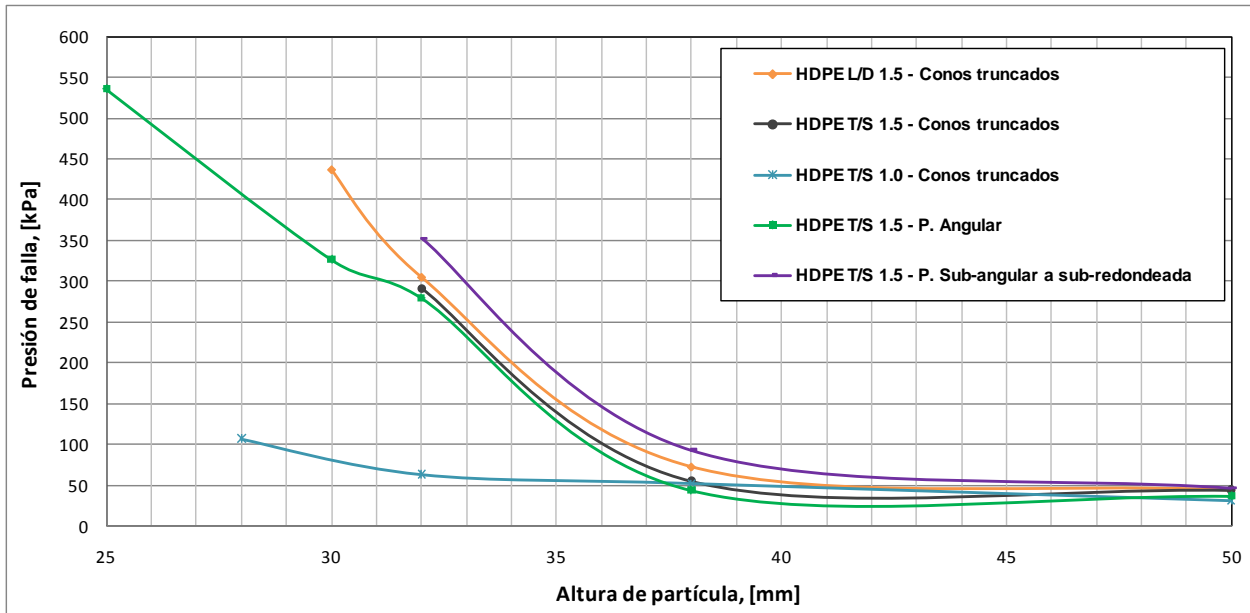


Figura 5.10: Resultados conos truncados y partículas confeccionadas - HDPE.

Se observa que en el caso de las partículas angulares, la curva tiene la misma tendencia que en los ensayos en que se utilizaron conos truncados, pero con una resistencia levemente menor, que concuerda con lo esperado, ya que las partículas confeccionadas tienen cantos muy angulosos, esto fue realizado con el propósito de representar el efecto que producen los materiales chancados comúnmente utilizados en Chile para estos efectos.

Cabe destacar que lo anterior se contradice con los ensayos ejecutados por D. Narejo (ref. 3) con partículas angulares, ya que la resistencia observada fue muy parecida a la obtenida de los ensayos en que se utilizaron conos truncados.

Por otra parte, de los ensayos realizados utilizando partículas sub-angulares a sub-redondeadas, la tendencia de la curva es similar a todas las anteriores, con un corrimiento hacia arriba, lo que indica que la geomembrana resiste más que en el caso de los conos truncados, resultados que concuerdan con los presentados en los antecedentes.

En forma promedio, se observa que en el caso de partículas angulares la resistencia de la geomembrana disminuye en un 15%, y para las partículas sub-angulares a sub-redondeadas aumentan en un 30%.

A su vez, en cuanto a los materiales lisos por ambas caras, se observa que su resistencia es levemente mayor que en el caso de materiales texturizados por una sola cara, de forma conservadora se consideran los resultados de los ensayos con materiales texturizados para plantear expresiones de diseño.

De lo anterior, y utilizando los resultados de los ensayos en los que no se produjo la rotura de la geomembrana, se obtienen las curvas de presión de falla para materiales de 1.00 y 1.50 [mm] de espesor y cualquier altura de partículas, como se presenta a continuación.

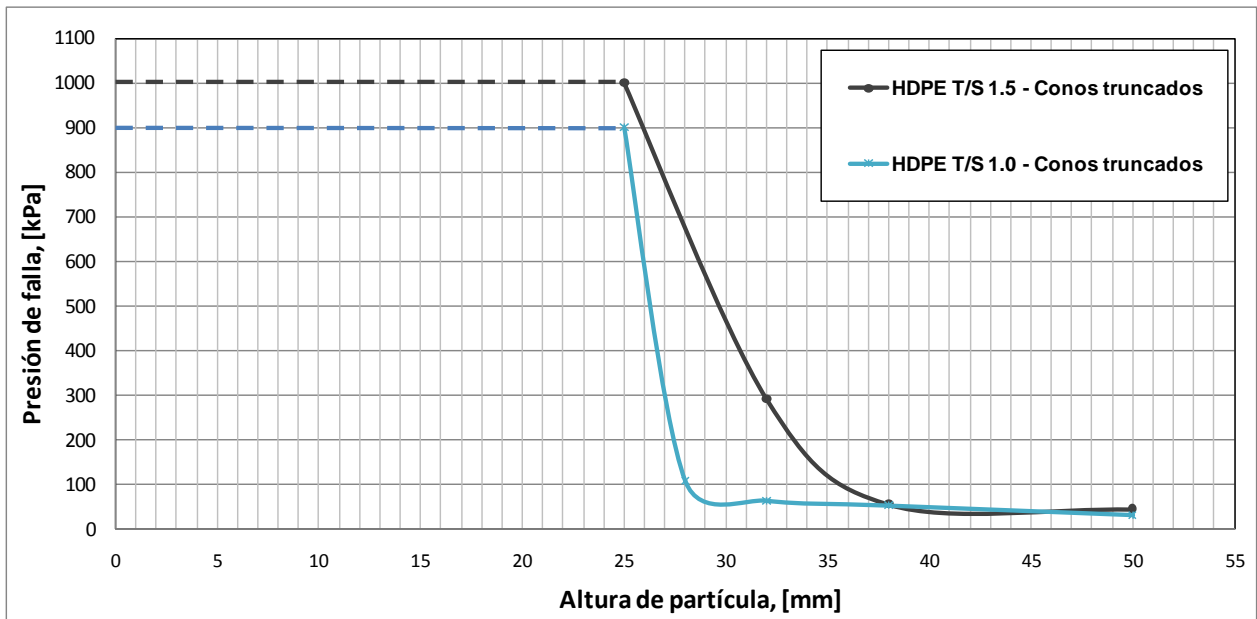


Figura 5.11: Presión de falla geomembrana HDPE 1.00 y 1.50 [mm] de espesor para alturas de conos inferiores a 25 [mm].

Las curvas presentadas anteriormente son conservadoras para alturas de partículas inferiores a 32 [mm] en materiales de 1.50 [mm] de espesor, y alturas inferiores a 28 [mm] para materiales de 1.00 [mm] de espesor, dado que sus resistencias son mayores a las consideradas.

En cuanto a los ensayos ejecutados con materiales de baja densidad (LLDPE), se utilizaron geomembranas de 1.00 [mm] de espesor y altura de conos truncados de hasta 80 [mm]. En la Figura 5.12 se presenta la geomembrana una vez finalizado el ensaye, donde se observa que ésta alcanzó grandes deformaciones, tomando completamente la geometría del fondo y los tres conos, sin que se produjera el punzonamiento de esta, para presiones de hasta 1000[kPa].

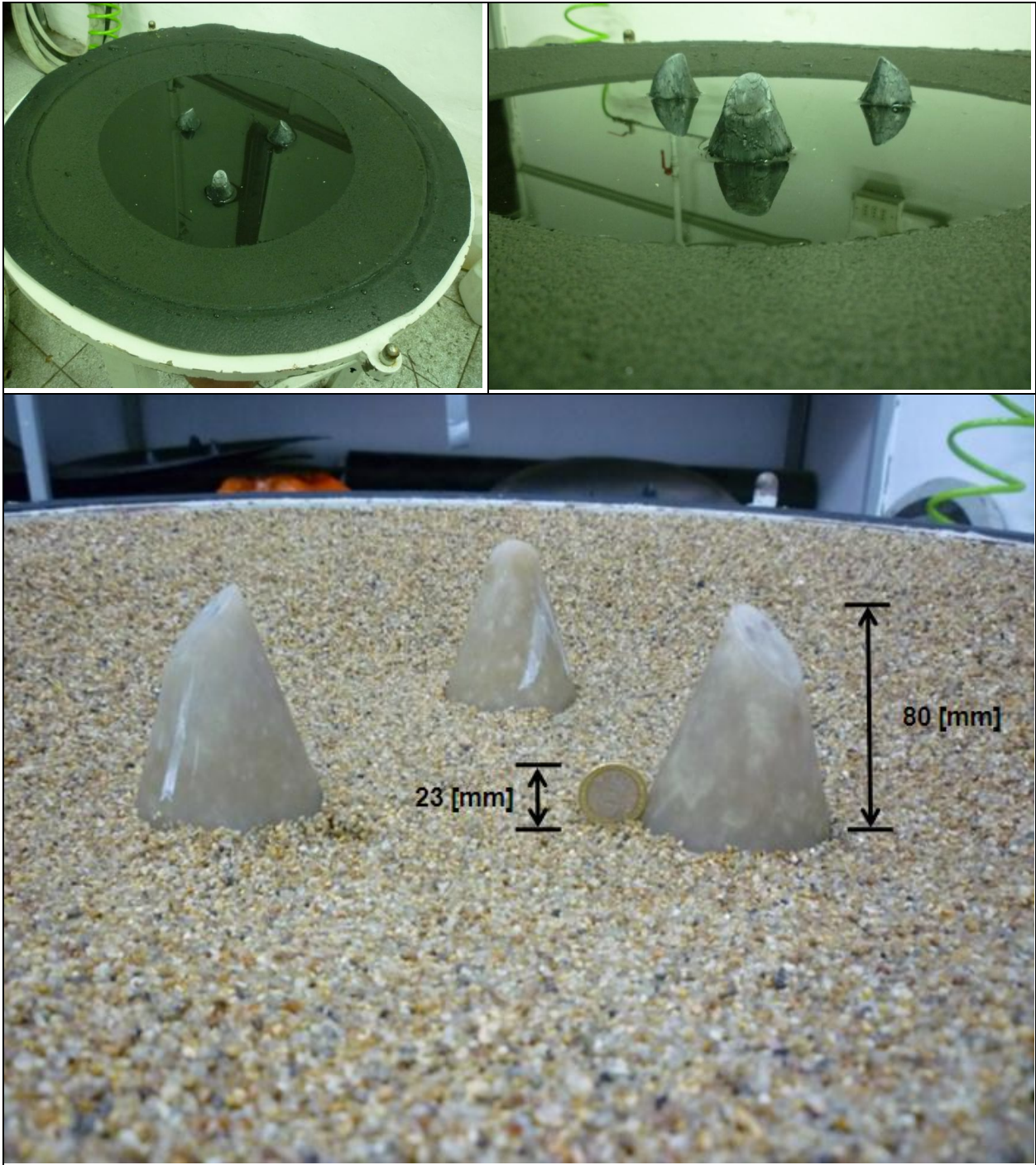


Figura 5.12: Geomembrana post ensaye - LLDPE 1.00 [mm] de espesor.

En la figura anterior se muestra la geomembrana deformada una vez finalizado el ensaye, con lo cual se deduce que los materiales de LLDPE son muy flexibles, al igual que las geomembranas de PVC.

5.7. MÉTODOS DE DISEÑO

Las expresiones de diseño presentadas en los antecedentes, han sido determinadas para evaluar los incrementos en la resistencia al punzonamiento a partir de distintos geotextiles utilizados para proteger la geomembrana.

Dado que la resistencia de la geomembrana tiende a ser constante para grandes alturas de cono, las expresiones de diseño conservadoramente sólo consideran la resistencia de la geomembrana en el tramo constante (grande alturas de cono), la cual es muy baja.

En base a la práctica chilena actual, en la cual se evalúa el desempeño de la geomembrana en base a ensayos geo-estáticos, se ha observado un buen desempeño de estos materiales sin elementos de protección, ya que las geomembranas son capaces de deformarse adaptándose a la geometría de las partículas, sin que se genere su rotura.

Producto de lo anterior, las expresiones de diseño existentes para el HDPE han sido modificadas, considerando la resistencia real de las geomembranas sin elementos de protección para materiales de 1.00 y 1.50 [mm] de espesor. A partir de lo anterior, la expresión propuesta para determinar la presión admisible de la geomembrana es la siguiente.

$$P_{adm} = \left(P_{GM} + 450 \frac{M}{H^2} \right) \left(\frac{1}{FM_S * FM_{PD} * FM_A} \right) \left(\frac{1}{FR_{CR} * FR_{CBD}} \right) \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

P_{adm} = Presión admisible [kPa]

P_{GM} = Presión de falla real del ensayo de punzonamiento hidrostático [kPa]

M = Masa por unidad de área geotextil de protección [g/m^2]

H = Altura efectiva de la Protuberancia (1/2 tamaño máx. partículas) [mm]

FM_S = Factor de modificación por la geometría de las partículas (*Shape*)

FM_{PD} = Factor de modificación por densidad del relleno (*Packing density*)

FM_A = Factor de modificación por efecto arco en suelos (*Arching*)

FR_{CR} = Factor de reducción por deformaciones a largo plazo (*Creep*)

FR_{CBD} = Factor de reducción por degradación química y biológica (*Chemical/biological degradation*)

La expresión anterior presenta el nuevo parámetro P_{GM} , el cual corresponde a la presión obtenida de los ensayos de punzonamiento hidrostático, ejecutados en la presente investigación y presentado en la Figura 5.13.

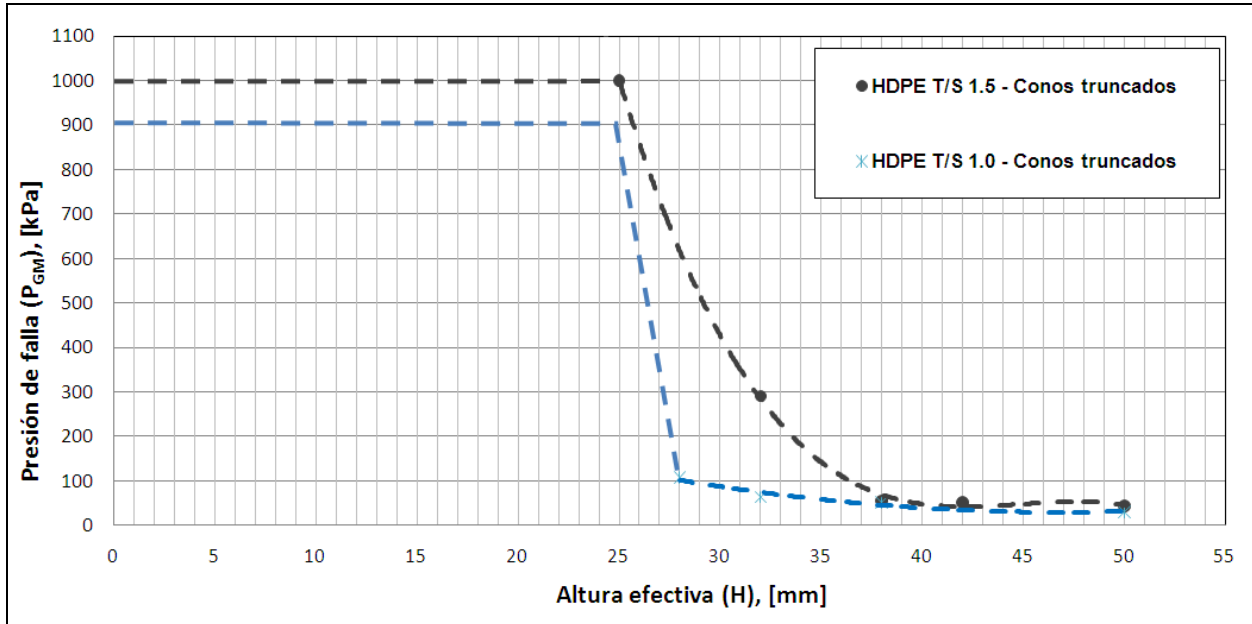


Figura 5.13: Curvas de diseño geomembranas HDPE 1.00 y 1.50 [mm] de espesor.

Para la generación de las curvas presentadas, se han utilizados funciones por tramos, de este modo se obtiene una mejor curva de ajuste a todos los puntos obtenidos de los ensayos. Estas expresiones se presentan a continuación.

- HDPE 1.00 [mm] de espesor, texturizado simple (“HDPE T/S 1.0” del gráfico):

$$P_{GM} = \begin{cases} 900 & H \leq 25[mm] \\ -264.3 * H + 7508 & 25[mm] < H \leq 28[mm] \\ 0.2 * H^2 - 18.9 * H + 473.3 & H > 28[mm] \end{cases} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

- HDPE 1.50 [mm] de espesor, texturizado simple (“HDPE T/S 1.5” del gráfico):

$$P_{GM} = \begin{cases} 1000 & H \leq 25[mm] \\ -0.13 * H^3 + 17.4 * H^2 - 777.6 * H + 11587 & H > 25[mm] \end{cases} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Las funciones presentadas anteriormente tienen un dominio que llega hasta alturas efectivas (H) de 50 [mm]. El material drenante no suele tener un tamaño máximo mayor a 2" (50 [mm] aprox.), por lo que para efectos de diseño sólo se utilizaría el tramo constante.

Por otra parte, en el caso de materiales de PVC se considera el factor de modificación por altura crítica de cono (FM_{CCH}), el que en este caso no ha sido considerado, ya que de los resultados de los ensayos no se puede asegurar que las geomembranas se hayan deformado completamente.

En forma adicional, se sabe que los materiales de HDPE sufren deformaciones por *creep*, por lo que si bien a una determinada presión no alcanzan en el corto plazo la forma completa del fondo, si lo podría hacer en largos períodos de tiempo, por lo que resulta arriesgado utilizar el factor de modificación por altura crítica.

Además, en cuanto al factor de modificación por geometría de las partículas (FM_S) como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos no concuerdan con los antecedentes que se tienen, por lo que se proponen nuevos valores para el factor de modificación, los cuales son más conservadores que los utilizados en la actualidad.

La Tabla 5.10 presenta los valores utilizados en la actualidad (antecedentes) y los propuestos para el factor de modificación por geometría de las partículas.

Tabla 5.10: Factores de modificación por geometría de las partículas (FM_S) propuestos.

Geometría de partículas	FM_S	
	Antecedentes	Propuestos
Angular	1.00	1.20
Sub-redondeada	0.50	0.75
Redondeada	0.25	-

Respecto a factor de modificación para partículas redondeadas, no fue posible la ejecución de dichos ensayos, producto de los daños generados en el sistema de control electrónico, por lo que no se tiene una correlación con los valores existentes.

Los valores de los otros factores de modificación o reducción no han sido analizados en este estudio, por lo que mantienen los valores presentados en los antecedentes.

En relación a las geomembranas de baja densidad (LLDPE), dado que para alturas de cono de 80 [mm] y presiones de hasta 1000 [kPa] no se produjo su rotura, se podría utilizar este valor como una constante en la resistencia de la geomembrana (P_{GM}), en la misma expresión que fue propuesta para materiales de alta densidad (HDPE).

5.8. RELACIÓN ENTRE MÉTODO DE DISEÑO PROPUESTO Y ENSAYES GEO-ESTÁTICOS

A continuación se presenta una comparación entre los resultados obtenidos, a partir de la expresión propuesta para el HDPE y los resultados obtenidos de ensayos geo-estáticos.

Se han considerado materiales de 1.50 [mm] de espesor, así los valores asociados a cada una de las variables son los siguientes:

- $P_{GM} = 1000$ [kPa] (altura efectiva menor o igual a 25 [mm])
- $FM_S = 1.2$ (partículas angulares)
- $FM_{PD} = 1.0$ (valor de la Tabla 3.5, conservador)
- $FM_A = 0.25$ (valor de la Tabla 3.6)
- $FR_{CR} = 1.0$ (valor de la Tabla 3.7)
- $FR_{CBD} = 1.0$ (valor de la Tabla 3.8)

Para relacionar ambos resultados, se han considerado ambos factores de reducción, *creep* y degradación química/biológica con un valor 1.0, ya que ambos efectos no son posibles de evaluar mediante el ensaye geo-estático.

Evaluando la presión admisible en la siguiente expresión:

$$P_{adm} = (1000) \left(\frac{1}{1.2 * 1.0 * 0.25} \right) \left(\frac{1}{1.0 * 1.1} \right) = 3333 \text{ [kPa]}$$

Respecto al factor de seguridad global (Tabla 3.3), su valor $FS = 3.0$. De este modo, la presión máxima vertical debido a la sollicitación vertical ($P_{m\acute{a}x}$) que podría soportar la geomembrana es de 1111 [kPa] (11.3 [kg/cm²]). Este valor coincide con los resultados de los ensayos geo-estáticos, ya que para geomembranas de HDPE de 1.50 [mm] de espesor, todos los casos con tensiones verticales inferiores a 13.2 [kg/cm²] presentaron un buen desempeño, con zonas de fluencia como “menor a moderado”.

Si bien existen ensayos con tensiones de hasta 20 [kg/cm²] que tuvieron un buen desempeño, existe un caso en que las zonas de fluencia clasificaron como “mayor a severo” con una carga de 16.6 [kg/cm²].

De lo anterior, se desprende que para depósitos que induzcan cargas de hasta 11 [kg/cm²], equivalente a 61 [m] de altura aproximadamente (considerando una densidad de $\gamma = 1.8$ [t/m³] para el mineral), las geomembranas de HDPE de 1.5 [mm] resistirían sin inconvenientes al ser utilizadas sin elementos de protección, en base a las características de los materiales drenantes presentados en este estudio. Para alturas mayores dependerá de las características del overliner si se requiere o no de elementos de protección para mitigar el efecto del punzonamiento.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En general, en la práctica internacional se suele utilizar geotextiles como elementos de protección al punzonamiento en geomembranas, lo que en Chile no es siempre aplicable, producto de la alta sismicidad existente.

La utilización de geotextiles disminuye en gran medida los parámetros de resistencia al corte en la base del depósito, ya que el ángulo de fricción en la interface “geomembrana-geotextil” (11° a 13°) es menor que en el caso “geomembrana-material drenante” (24° a 26°). Así para un mismo diseño geométrico de la pila, con la utilización de geotextiles se tendrán menores factores de seguridad ante los eventuales deslizamientos en bloque, tanto para la condición estática como pseudo-estática.

En algunos casos, en los que la altura del depósito o las características del material drenante no permitan el contacto directo entre éste último y la geomembrana, es posible utilizar estratos de materiales finos entre la membrana y el material drenante, de este modo disminuye el efecto del punzonamiento y no se reduce en gran medida los parámetros de resistencia al corte en la base del depósito.

En la práctica habitual chilena se utilizan ensayos geo-estáticos para evaluar el comportamiento de un material drenante en contacto directo con la geomembrana. A partir de la recopilación y análisis de distintos ensayos geo-estáticos, se desprende que bajo ciertas condiciones de carga y granulometría del material drenante, es posible no utilizar geotextiles como elemento protector de la geomembrana sin aumentar el riesgo de punzonamiento.

Estos resultados se contradicen con las expresiones de diseño utilizadas en la actualidad, que consideran una resistencia muy baja en el caso del HDPE sin elementos de protección, incluso se desprecia para materiales de PVC, obteniendo así diseños muy conservadores si se ejecutan por esta vía.

Por otra parte, de los resultados de los ensayos geo-estáticos se desprende que el punzonamiento de la geomembrana no sólo depende de la angularidad de las partículas y su tamaño máximo, como se presenta en las expresiones de diseño existentes, también depende de la graduación del material drenante.

Como se presentó en capítulos anteriores, el material E-3 tiene un tamaño máximo de partículas de 2” (50 [mm] aprox.), con un contenido de gravas del 99% prácticamente uniformes (monotamaño). Este material indujo el punzonamiento de una geomembrana LLDPE de 2.00 [mm] con una carga de

36 [kg/cm²]. Por otra parte, ensayos muestran que la misma geomembrana, con igual sollicitación y tamaño máximo de partículas, pero diferente graduación, sólo produjo una fluencia “moderada” del geosintético.

Lo anterior tiene relación con el número de contactos que existen entre el material y la geomembrana, reduciendo por esta vía la concentración de tensiones sobre la geomembrana.

En cuanto a la flexibilidad de las geomembranas de HDPE, se observa que los materiales disponibles en el mercado actualmente presentan un gran aumento en la capacidad de deformarse, lo que conlleva un aumento en la resistencia al punzonamiento. Esto debido a las mejoras en las materias primas utilizadas y procesos de producción de las geomembranas.

Es importante recalcar que el ensaye de punzonamiento estándar (ASTM D4833) permite solamente determinar en forma comparativa la resistencia de los distintos materiales geosintéticos, dado que no se controla la deformación a la cual se produjo la rotura, por lo que no refleja el real comportamiento de las geomembranas en servicio.

En relación a lo anterior, observa que los materiales ensayados por D. Narejo *et al.* (Tabla 3.1) tienen una resistencia de 480 [N], igual a los requerimientos establecidos en la actualidad por el GRI- GM 13 (Tabla 5.6), en ambos casos para geomembranas de HDPE lisas de 1.50 [mm] de espesor.

Respecto al efecto de la angularidad de las partículas, se han propuestos nuevos valores para el factor de modificación por la geometría de éstas (FM_s), en función de las características geométricas de los materiales utilizados actualmente en la práctica chilena, los que en la mayoría de los casos suelen ser producidos a partir de proceso de chancado.

En el caso de materiales de PVC, T. D. Stark propone utilizar el factor de modificación por altura crítica de cono (FM_{CCH}), dado que para determinadas alturas de cono no se produciría la rotura de la geomembrana, independiente de la presión utilizada. Por otra parte, se observó que materiales de LLDPE presentan una flexibilidad similar al PVC, por lo que tendría una altura crítica de cono similar (cercana a los 80 [mm]).

Lo anterior se contradice con lo observado en los ensayos geo-estáticos con LLDPE, donde sí se produjo el punzonamiento con tamaño máximo de partículas de 50 [mm]. Esto indica que la utilización de dicho parámetro subdimensionaría los diseños, pudiendo entregar resultados alejados de la realidad.

Respecto a las modificaciones propuestas para la expresión general de diseño, la resistencia asociada a la geomembrana sin elementos de protección es conservadora, debido a que durante la ejecución de los ensayos no se produjo el punzonamiento de las muestras para alturas de cono inferiores a 25 [mm], por lo que las resistencias consideradas de 1000 [kPa] en el caso del HDPE de 1.5 [mm] y 900 [kPa] para los materiales de 1.00 [mm], son inferiores a la resistencia real de estos materiales.

Para la relación existente entre la nueva expresión propuesta y los ensayos geo-estáticos, se observa que son coincidentes, ya que para depósitos que induzcan una carga inferior a 11 [kg/cm^2] (61 [m] de altura aprox.), es posible la utilización de geomembranas de HDPE de 1.50 [mm] de espesor sin elementos de protección. Para alturas mayores dependerá de las características del material drenante si es necesario utilizar geotextiles, como elementos de protección.

En general, es recomendable que para depósitos con alturas sobre 150 [m] se utilicen geotextiles en la medida de lo posible (condicionado por la estabilidad), pese a que ensayos como el geo-estático indiquen que no se produce la rotura de la geomembrana, esto porque dicho ensaye no considera las deformaciones a largo plazo en el caso de materiales de HDPE, y tampoco considera la disminución en la resistencia producto de la degradación química/biológica del material producto del flujo de la solución ácida o los agentes climáticos.

También, en el caso de pilas de lixiviación dinámicas, la verificación del punzonamiento se debe realizar considerando la carga vertical transferida por las ruedas de los camiones durante los procesos de carga/descarga, debido que ésta suele ser mayor que la del material depositado.

Un factor que no es considerado en ambas metodologías existentes, y que podría eventualmente disminuir la resistencia al punzonamiento, es el estado tensional inicial de la geomembrana en terreno. Esto tiene relación con la inclinación basal de las pilas, que en general no supera un 5%, lo que produce una tracción en la geomembrana y disminuye su capacidad de deformarse.

En base a todo lo anterior, se concluye que las expresiones propuestas son válidas para estimar el espesor de la geomembrana y el tipo de geotextil, éste último si fuese necesario para evitar el punzonamiento, pero dichas expresiones no reemplazan el ensaye de punzonamiento geo-estático, el cual permite verificar el nivel de deformaciones de la geomembrana al producirse la rotura, y si se produce o no el punzonamiento de ésta.

Es importante recalcar, que pese a que en la realización del ensaye de punzonamiento geo-estático no se produzca el punzonamiento de la geomembrana, el nivel de daño o “zona de fluencia” debe encontrarse en un nivel incipiente, ya que existen factores como el estado de tensiones inicial de la geomembrana, o factores a largo plazo (*creep* y degradación química/biológica) que no son considerados en dicho ensaye.

Respecto a la fluencia lenta (*creep*) en materiales de HDPE fabricados en la actualidad, es necesario realizar ensayes para evaluar su efecto, ya que este puede ser menor al considerado, producto de la mayor flexibilidad que este material presenta.

Finalmente, en relación al espesor del estrato del material drenante, en general se recomienda que sea de 75 a 100 [cm], pese a que la recopilación de antecedentes indique que varía de 50 a 100 [cm]. Esto porque los procesos de carga/descarga del mineral apilado representan una de las condiciones más desfavorables, sobre todo en pilas dinámicas.

7. RECOMENDACIONES

El presente capítulo tiene como objetivo plantear mejoras que se pueden llevar a cabo en el equipo diseñado, con el propósito de realizar ensayos de punzonamiento de geomembranas con altas presiones y obtener resultados en rangos mayores a los estudiados hasta ahora, lo que podría ampliar el conocimiento que se tiene de estos materiales. A su vez, se recomienda una forma de enfocar un nuevo programa de ensayos, que permita mejorar el procedimiento de evaluación del comportamiento de los materiales.

En cuanto al equipo, éste se encuentra complemente operativo, a continuación se proponen modificaciones para mejorarlo:

- Mejorar el sistema de cierre, el que actualmente es mediante una goma que funciona como o-ring, dado que a presiones cercanas a los 120-130 [psi] se produce una salida parcial de agua desde el interior de la cámara, disminuyendo la velocidad con la cual aumenta la presión al interior de la cámara de ensayos.
- La goma mencionada anteriormente es la que además sujeta la geomembrana, por lo que eventualmente podría producirse un deslizamiento de ésta con altas presiones.
- Para evaluar el estado de deformaciones final de las muestras, y saber si se deformó completamente hasta alcanzar la forma del fondo, se propone pintar la cara inferior de la geomembrana con el mismo lápiz que se utiliza para marcarlas, ya que se observó que la pintura se traspasa hasta los conos, por lo que sirve como trazador.
- El sistema de control utilizado se dañó producto del “ruido” existente en la red eléctrica de la planta. El circuito principal fue sustituido y para evitar nuevas fallas se recomienda la utilización de una UPS (*uninterrupted power supply*), las cuales son utilizadas para alimentar sistemas electrónicos durante cortes del suministro eléctrico.

Algunos de estos dispositivos tienen una configuración *on-line*, mediante la cual filtra la corriente de alimentación, entregando voltajes constantes y libres de “ruido”. Así se evitarán nuevas fallas que pudiesen producirse en el equipo.

En relación a un nuevo programa de ensayos de laboratorio, una vez que las mejoras permitan llegar a la presión máxima con la cual fue diseñado el sistema de control, 250 [psi] ó 1723 [kPa], se pueden realizar los siguientes ensayos:

- Ensayes con alturas inferiores a 25 [mm] con HDPE, de este modo se completa la información inexistente hasta ahora.
- Ensayes para evaluar las deformaciones a largo plazo (*creep*) en materiales de HDPE.
- Realizar ensayos con materiales de LLDPE, utilizando conos truncados y las partículas confeccionadas.
- Realizar ensayos con HDPE y LLDPE, utilizando un estrato de material drenante. El material puede ser preparado con la banda granulométrica que ha sido determinada en la presente investigación, considerando distintas geometrías de partículas. De esta manera se podrá evaluar el efecto de la graduación.

En cuanto el estado final de la geomembrana post ensaye geo-estático, la descripción de las zonas de fluencia es realizada a partir de una inspección visual, y en otros laboratorios en forma adicional se hacen pruebas en cámaras de vacío, aplicando una presión de 6 [psi] para verificar si la geomembrana tiene roturas que no sean visibles.

Esta metodología puede inducir errores, ya que materiales más flexibles como el LLDPE o PVC son capaces de alcanzar grandes deformaciones, lo que no implica una gran disminución en sus parámetros mecánicos o de resistencia. Producto de esto, se recomienda la realización de ensayos para determinar en forma certera la disminución de resistencia. Por ejemplo tracción uniaxial en las muestras extraídas de la membrana que resistió el punzonamiento, producto del ensaye geo-estático.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Stark, T. D., Choi, H. and Diebel, P. W., 2005, "*Influence of plasticizer molecular weight on plasticizer retention in PVC geomembrane*". Geosynthetics International, 12, No. 2, 000-000.
- [2] Wilson-Fahmy, R. F., Narejo, D. and Koerner, R. M., 1997, "*Puncture Protection of Geomembranes Part I: Theory*", Geosynthetics International, Vol. 3, No.5, pp. 605-628.
- [3] Narejo, D., Koerner, R. M. and Wilson-Fahmy, R. F., 1997, "*Puncture Protection of Geomembranes Part II: Experimental*", Geosynthetics International, Vol. 3, No. 5, pp. 629-653.
- [4] Koerner, R. M., Wilson-Fahmy, R. F. and Narejo, D., 1997, "*Puncture Protection of Geomembranes Part III: Examples*", Geosynthetics International, Vol. 3, No. 5, pp. 655-675.
- [5] Koerner, R. M., Hsuan, Y. G., Koerner G. R. and Gryger, D., 2009, "*Ten year creep puncture study of HDPE geomembranes protected by needle-punched nonwoven geotextiles*", Geotextiles and Geomembranes.
- [7] Stark, T. D. and Pazmino L. F., 2009, "*Puncture protection of PVC geomembranes*", Geosynthetics International, 16.
- [8] Stark, T. D., Boerman, T. R. and Connor, C. J., 2005, "*Puncture resistance of PVC geomembranes using the truncated cone test*", Geosynthetics International, 15, No. 6, pp. 480-486.
- [9] ASTM D 5514, "*Standard Test Method for Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics*", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [10] Krumbein, W. and Sloss, L, 1963, "*Stratigraphy and Sedimentation*". San Francisco, W.H. Freeman ,pp. 497.
- [11] ASTM D 4833, "*Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products*", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Anexo A: Algoritmo sistema de control

// Software para el sistema de control del equipo del Trabajo de Título "Estudio experimental del punzonamiento en interfaces de depósitos de minerales"

// Última actualización 10/07/2011

// Variables de entrada

float ivel = 0; // Velocidad [psi/min]

float maxpsi = 0 ; // Presión máxima con la cual se realizará el ensayes

float C1 = 0; // C1=A en Ec. $Y = (Ax+B)$

float C2 = 0; // C2=B en Ec. $Y = (Ax+B)$

// Variables para el desarrollo del software

float vel = 0; // Almacena la velocidad del ensaye

int sensorPresion = 0; // Guardar las lecturas del sensor de presión

float presR = 0; // Presión real promedio de varias lecturas del sensor

float presT = 0; // Presión teórica

float deltapres = 0.3; // Diferencia de presión (entre la teórica y la real)

float pres0 = 0; // Presión inicial

long time1 = 0; // Tiempo inicial

long time2 = 0; // Variable tiempo para envío de datos

long time3 = 0; // Variable para estabilización de la presión post apertura

long time4 = 0; // Variable de tiempo auxiliar

long time5 = 0; // Variable de tiempo auxiliar

char serialMonitorBuffer [5]; // Arreglo para almacenar las variables de entrada

int row = 0;

float value = 0;

int h = 0;

void setup() {

Serial.begin(9600);

pinMode (5, OUTPUT); // Pin 1 válvula

pinMode (3, OUTPUT); // Pin 2 válvula

pinMode (7, INPUT); // Sensor de agua

Serial.println("Se han omitido los tildes para que no se desconfigure el texto");

```

Serial.println("En cualquier punto del ensaye de puede ingresar el numero 6 para
detenerlo");
Serial.println(" ");
Serial.println("Debe ingresar el numero de sensor (1, 2 o 3), luego teclear Enter");
Serial.println(" ");
}

void loop() {

// Leer variables de entrada
if (Serial.available()){
  delay(5);
  int i=0;
  while(i < 5){
    serialMonitorBuffer[i] = Serial.read();
    i++;
  }
  value = atof(serialMonitorBuffer);
  row++;
  if(value == 6.0 ){ // Reinicia todo y deja el listo para el próximo ensaye
    vel = 0;
    ivel =0;
    maxpsi = 0;
    C1 = 0;
    C2 = 0;
    h=0;
    value = 0;
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Se ha detenido el ensaye");
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Recuerde grabar la informacion");
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Para limpiar la pantalla y comenzar un nuevo ensaye utilizar el boton Clear en el menu
superior");
    Serial.println("Luego ingresar el numero de sensor (1, 2 o 3)");
  }
}

```

```

if((value > 5.0) && (value < 5.999)){ // Carga la velocidad del ensaye
    float var1 = (value - 5.0) * 1000;
    ivel = ((float)var1)/10;
    value = 0;
    Serial.println(" ");
    Serial.print("Se ha ingresado la velocidad:");
    Serial.println(ivel);
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Se ha dado inicio al ensaye, si desea detenerlo ingrese el numero 6");
    Serial.println(" ");
}

if((value > 4.0) && (value < 4.251) ){ // Carga la presión máxima
    float var2 = (value - 4.0) * 1000;
    maxpsi = (float)var2 ;
    value=0;
    Serial.println(" ");
    Serial.print("Se ha ingresado la presion maxima:");
    Serial.println(maxpsi);
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Se debe ingresar la velocidad del ensaye, para ello ingresar en el formato      5.Y");
    Serial.println("Por ejemplo, si Velocidad = 1 [psi/min] ingresar 5.01 (maximo 99 [psi/min])");
    Serial.println("Si Velocidad = 0.1 [psi/min] ingresar 5.001 (minimo 0.1 [psi/min]), luego teclear
    Enter");
    Serial.println("Luego de cargar la ultima variable (velocidad) el ensaye iniciara automaticamente");
}

if(value == 3.0 ){ // Carga las constantes del sensor 3
    C1 = 3.697;
    C2 = 0.247;
    value=0;
    Serial.println("Se ha ingresado el sensor 3");
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Se debe ingresar la presion maxima, para ello ingresar en el formato 4.X");
    Serial.println("Por ejemplo, si Presion maxima = 100 [psi] ingresar 4.100 (maximo 250 [psi]) ");
    Serial.println("Si la presion es inferior a 100 [psi], por ejemplo 50 [psi], ingresar 4.050. Luego teclear
    Enter");
}

```

```

}

if(value == 2.0){ // Carga las constantes del sensor 2
C1 = 3.914;
C2 = 0.973;
value=0;
Serial.println("Se ha ingresado el sensor 2");
Serial.println(" ");
erial.println("Se debe ingresar la presion maxima, para ello ingresar en el formato 4.X");
Serial.println("Por ejemplo, si Presion maxima = 100 [psi] ingresar 4.100 (maximo 250 [psi]) ");
Serial.println("Si la presion es inferior a 100 [psi], por ejemplo 50 [psi], ingresar 4.050. Luego teclear
Enter");
}

if(value == 1.0){ // Carga las constantes del sensor 1
C1 = 3.914;
C2 = 0.973;
value=0;
Serial.println("Se ha ingresado el sensor 1");
Serial.println(" ");
Serial.println("Se debe ingresar la presion maxima, para ello ingresar en el formato 4.X");
Serial.println("Por ejemplo, si Presion maxima = 100 [psi] ingresar 4.100 (maximo 250 [psi]) ");
Serial.println("Si la presion es inferior a 100 [psi], por ejemplo 50 [psi], ingresar 4.050. Luego teclear
Enter");
}
}

// Iniciar ensaye
if((h==0) && (ivel>0) && (maxpsi>0) && (C1>0) && (C2>0)){
vel=ivel; // Cambia la velocidad
pres0 = medir_presion(); // Guarda la presión inicial
time1 = millis(); // Guarda el tiempo cuando inicia el ensaye
h = 1;
}

// Envio de datos
time2 = millis();
if ( (time2-time3 >= 1200) and (vel>0) ) {

```

```

presR = medir_presion();           // Guarda la presión
Serial.print((time2-time1));       // Imprime el tiempo
Serial.print(" ");
if ((presR-pres0) >= 0){
  Serial.print(presR-pres0, DEC);   // Imprime la presión corregida por la presión inicial
}
else {
  float j = 0;
  Serial.print(j,DEC);             // Imprime presión cero
}
Serial.print(" ");
if (digitalRead(7) == 0){         // Sensor de humedad
  Serial.println("Seco");
}
else {
  Serial.println("Mojado");
}
time3 = millis();
}

// Ejecución del ensaye
time4 = millis();
if( ((time4-time5)>=850) and (vel>0) ){
  presT = (vel*(time4-time1))/60000; // Calcula la presión teórica
  presR = medir_presion();           // Mide la presión real
  if ((presT) < maxpsi
    if ((presR-pres0) < (presT - deltapres)){ // Verifica si es necesario o no abrir la válvula
      valvula();                             // Abre la válvula
      time5=millis();                         // Tiempo para el delay de la valvula
    }
  }
else { // Asume que se está en el tramo a la presión máxima constante
  if ((presR-pres0) < (maxpsi - deltapres)){ // Verifica si es necesario o no abrir la válvula
    valvula();                               // Abre la válvula
    time5=millis();                          // Tiempo para el delay de la valvula
  }
}
}
// Aquí se a acaba el void loop

```

```
}
```

```
// Función para abrir la válvula
```

```
void valvula() {
```

```
    digitalWrite (5, HIGH);           // Abre la válvula
```

```
    digitalWrite (3, LOW);
```

```
    delay(35);                         // Tiempo que estará abierta la válvula
```

```
    digitalWrite (5, LOW);           // Cierra la válvula
```

```
    digitalWrite (3, LOW);
```

```
}
```

```
// Función para medir la presión
```

```
float medir_presion() {
```

```
    float aux;
```

```
    aux = 0;
```

```
    for (int i=1; i <= 80; i++){
```

```
        sensorPresion = analogRead(A5);
```

```
        aux = aux + (sensorPresion/C1+C2);
```

```
        delay(3);
```

```
    }
```

```
    aux = aux/80;
```

```
    return aux;
```

```
}
```


Anexo B: Partículas confeccionadas para ejecución de ensayos.



Figura A.1: Partículas angulares.



Figura A.2: Partículas sub-angulosas a sub-redondeadas.



Figura A.3: Partículas redondeadas.

Anexo C: Granulometría de materiales analizados.

Código proyecto	N° Muestra	Porcentaje que pasa [%]																		
		Tamiz	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	#10	#16	#20	#30	#40	#50	#60	#100	#140	#200
		Diámetro	50.8	38.1	25.4	19.05	12.7	9.525	4.760	2.360	2.000	1.180	0.85	0.600	0.425	0.300	0.250	0.150	0.106	0.074
A	1		100	94	82	74	-	55	42	-	32	-	-	-	15	-	-	-	-	3
B	1		100	100	99	83	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
B	2		100	100	97	72	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
B	3		100	100	96	67	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
C	1		100	90	70	50	35	27	15	-	8	-	-	-	0	0	0	0	0	0
C	2		100	88	63	38	19	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	1		100	95	73	58	41	34	21	16	15	12	10	9	7	6	-	5	-	3
E	1		100	100	96	88	74	66	46	-	32	22	15	8	1	0	0	0	0	0
E	2		100	100	99	92	75	62	33	19	16	11	8	6	3	3	-	3		3
E	3		100	76	27	3	-	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	4		100	85	70	57	45	38	24	18	17	12	10	8	6	5	-	4	-	4
E	5		100	81	60	49	38	32	20	16	15	11	9	7	5	4	-	4	-	3
E	6		100	98	77	52	34	27	17	12	10	8	5	3	1	1	-	0	0	0
E	7		100	100	76	51	34	28	17	11	10	7	5	3	1	0	0	0	0	0
F	1		100	100	87	66	-	35	22	-	17	-	-	-	9	-	-	-	-	5
F	2		100	100	85	66	-	40	27	-	19	-	-	-	11	-	-	-	-	6
G	1		100	100	90	71	53	42	29	21	19	14	11	10	8	7	-	5	-	3
G	2		100	100	88	71	53	41	30	19	17	12	10	8	7	6	-	4	-	3
H	1		100	100	94	86	70	58	38	-	28	-	-	-	16	-	-	-	-	3
I	1		100	100	96	82	57	-	38	-	25	-	-	-	11	-	-	-	-	6

Código proyecto	N° Muestra	Porcentaje que pasa [%]																		
		Tamiz	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	#10	#16	#20	#30	#40	#50	#60	#100	#140	#200
		Diámetro	50.8	38.1	25.4	19.05	12.7	9.525	4.760	2.360	2.000	1.180	0.85	0.600	0.425	0.300	0.250	0.150	0.106	0.074
J	1		100	85	70	60	-	39	24	-	17	-	13	-	11	-	9	7	5	3
K	1		100	100	72	56	40	31	17	-	12	-	-	-	7	-	-	-	-	4
K	2		100	100	79	67	51	41	24	-	18	-	-	-	10	-	-	-	-	6
K	3		100	100	86	74	61	53	33	-	24	-	-	-	13	-	-	-	-	8
L	1		100	100	100	99	85	72	52	-	42	-	-	-	30	-	-	-	-	22
M	1		100	100	100	98	-	67	45	-	33	-	-	-	20	-	-	15	-	13
M	2		100	100	100	97	-	69	47	-	32	-	-	-	19	-	-	13	-	11
N	1		100	100	100	100	99	95	64	-	34	-	-	-	16	-	-	-	-	10