

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y
Formales
Escuela Profesional de Ingenierías de Minas



**“OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DE UNA
GEOMEMBRANA DE ALTA Y BAJA DENSIDAD USANDO UNA
SUSTANCIA IMPERMEABILIZADORA EN EL PROCESO DE
LIXIVIACIÓN DE COBRE”**

Tesis presentada por el Bachiller:

Palomino Linares, Johanés Jimmy

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Bernedo Tito, Edwin José

Arequipa – Perú
2022

DICTAMEN APROBATORIO

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA DE MINAS
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 31 de Mayo del 2022

Dictamen: 001134-C-EPIM-2022

Visto el borrador del expediente 001134, presentado por:

2014800321 - PALOMINO LINARES JOHANES JIMMY

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DE UNA GEOMEMBRANA DE ALTA Y BAJA DENSIDAD
USANDO UNA SUSTANCIA IMPERMEABILIZADORA EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE COBRE**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

2346 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR



2781 - BARREDA DEL CARPIO JAIME ERNESTO
DICTAMINADOR



2872 - LOPEZ CASAPERALTA PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR

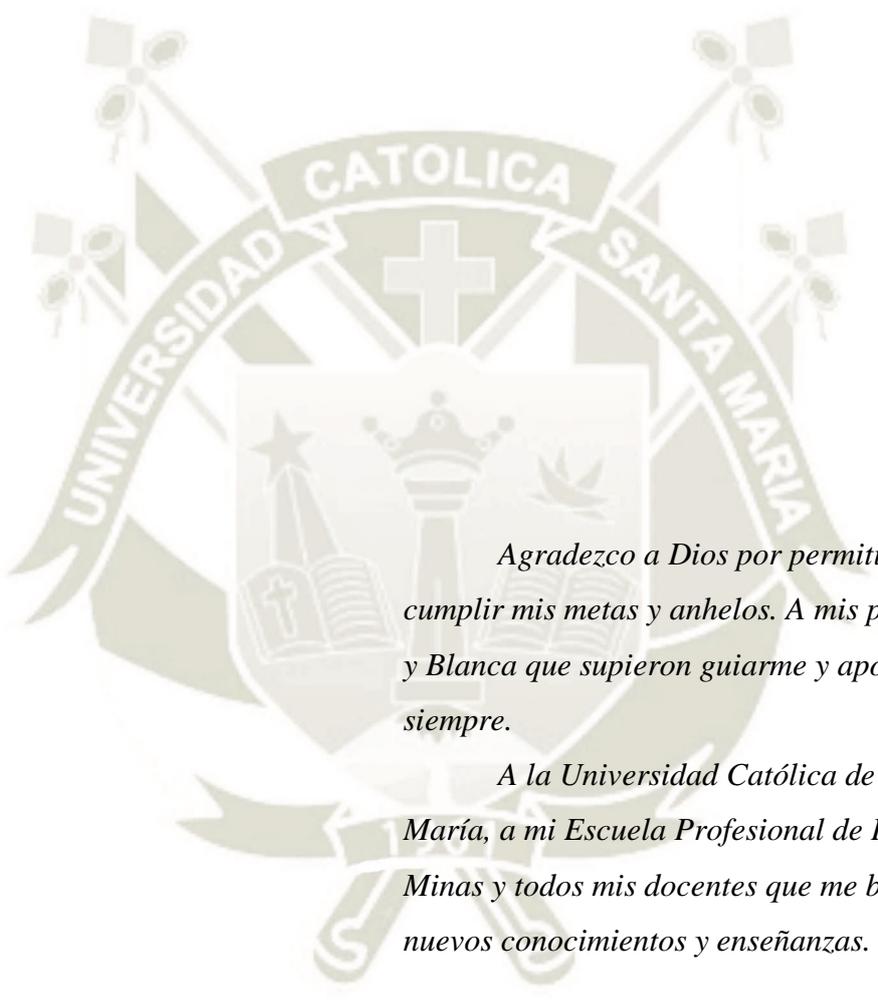


DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a Dios porque él hace posible la mayoría de las cosas en mi vida, a mis padres Hugo y Blanca porque sin su apoyo incondicional nada de esto hubiera sido posible, a mi hermano Hugo, a mi novia Yomira que siempre está apoyándome en todos mis proyectos y a mi hijo Ezequiel que es mi mayor motivación para seguir esforzándome para conseguir mis metas y ser un ejemplo para él. También a todas las personas que conocí durante mi carrera que de alguna forma me ayudaron a que esto sea posible.



AGRADECIMIENTO



Agradezco a Dios por permitirme llegar a cumplir mis metas y anhelos. A mis padres Hugo y Blanca que supieron guiarme y apoyarme siempre.

A la Universidad Católica de Santa María, a mi Escuela Profesional de Ingeniería de Minas y todos mis docentes que me brindaron nuevos conocimientos y enseñanzas.

RESUMEN

Las geomembranas sufren roturas durante el proceso de recuperación de cobre en las pilas de lixiviación, en la presente investigación se buscó mejorar las propiedades de resistencia mecánica de la geomembrana, para tal fin se realizaron diferentes pruebas de resistencia a la tracción en un equipo Demtech profesional; a la perforación en equipo fabricado para la presente investigación, según la especificación de la Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales ASTM D6241, y prueba de temperatura según investigaciones previas, todo esto tanto para geomembranas de polietileno de alta densidad HDPE, como para geomembranas de polietileno de baja densidad LLDPE, la segunda mayormente usada en las pilas de lixiviación de cobre.

La experimentación consistió en recubrir geomembranas con un elemento impermeabilizante de alta resistencia mecánica y aparte tener un grupo de control, confeccionando 10 muestras con medidas específicas según la norma de ASTM 6392 por cada grupo, para posteriormente realizar una prueba de tracción tal como se muestra en la figura 28 y otras, para la evaluación de las medidas no solo se tomó en cuenta el promedio sino se evaluó mediante pruebas estadísticas de medición de varianzas tanto T-Student como ANOVA, esto se realizó del mismo modo para los dos tipos de geomembranas.

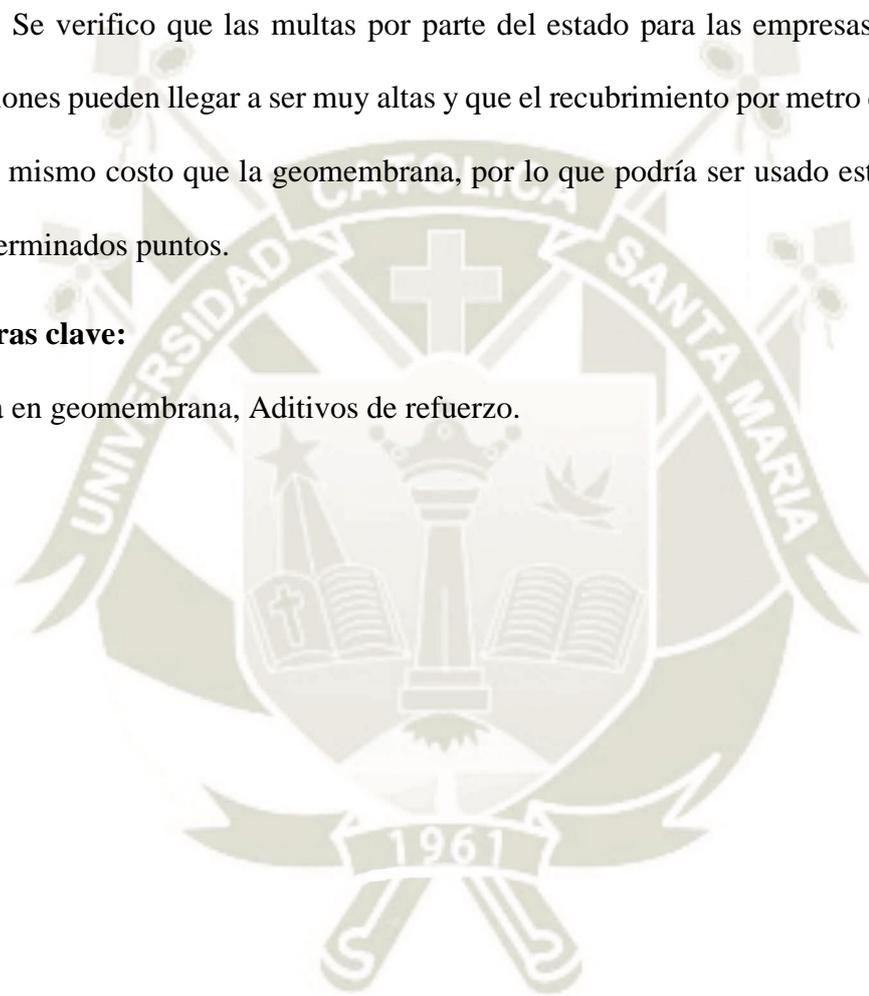
La prueba de temperatura se desarrolló con el fin de verificar si las geomembranas recubiertas resistían menos tras someterlas a la solución de lixiviación tal como se muestra en la figura 26, pero a una temperatura de 50 °C, la temperatura elevada se debe a que esta es una forma de multiplicar el tiempo de evaluación que tendría que realizarse en años. Realizada las pruebas de tracción a este grupo de geomembranas no se notó diferencia significativa con las geomembranas que no pasaron por prueba de temperatura.

Finalmente se realizó una prueba de perforación a ambos grupos de geomembranas tal como se ve en la figura 32. Que consistió en tener un grupo de control y un grupo recubierto, luego de evaluar ambos grupos se encontraron diferencias estadísticamente significativas teniendo un mayor soporte mecánico antes de la rotura las muestras recubiertas.

Se verifico que las multas por parte del estado para las empresas que permitan filtraciones pueden llegar a ser muy altas y que el recubrimiento por metro cuadrado tiene casi el mismo costo que la geomembrana, por lo que podría ser usado estratégicamente en determinados puntos.

Palabras clave:

Rotura en geomembrana, Aditivos de refuerzo.



ABSTRACT

Geomembranes break during the copper recovery process in the leach pads, in the present investigation we sought to improve the mechanical resistance properties of the geomembrane, for this purpose different tensile strength tests were carried out in a professional Demtech team; to drilling in equipment manufactured for the present investigation, according to the specification of the American society for tests and materials ASTM D6241, and temperature test according to previous investigations, all this for both HDPE high-density polyethylene geomembranes and polyethylene geomembranes low-density LLDPE, the second most widely used in copper leach pads.

The experimentation consisted of coating geomembranes with a waterproofing element of high mechanical resistance and apart from having a control group, making 10 samples with specific measurements according to the ASTM 6392 standard for each group, to later carry out a tensile test as shown in Figure 28 and others, for the evaluation of the measures, not only the average was taken into account, but it was also evaluated through statistical tests of variance measurement, both T-Student and ANOVA, this was done in the same way for the two types of geomembranes.

The temperature test was developed in order to verify if the coated geomembranes resist less after being subjected to the leaching solution as shown in figure 26, but at a temperature of 50 °C, the high temperature is due to the fact that this is a way to multiply the evaluation time that would have to be done in years. Once the tensile tests were carried out on this group of geomembranes, no significant difference was noted with the geomembranes that did not pass the temperature test.

Finally, a perforation test was carried out on both groups of geomembranes as seen in figure 32. This consisted of having a control group and a coated group. After

evaluating both groups, statistically significant differences were found, having a greater mechanical support before of breaking the coated samples.

It was verified that the fines by the state for companies that allow leaks can be very high and that the coating per square meter has almost the same cost as the geomembrane, so it could be used strategically in certain points.

Keywords:

Rupture in geomembrane, reinforcement additives.



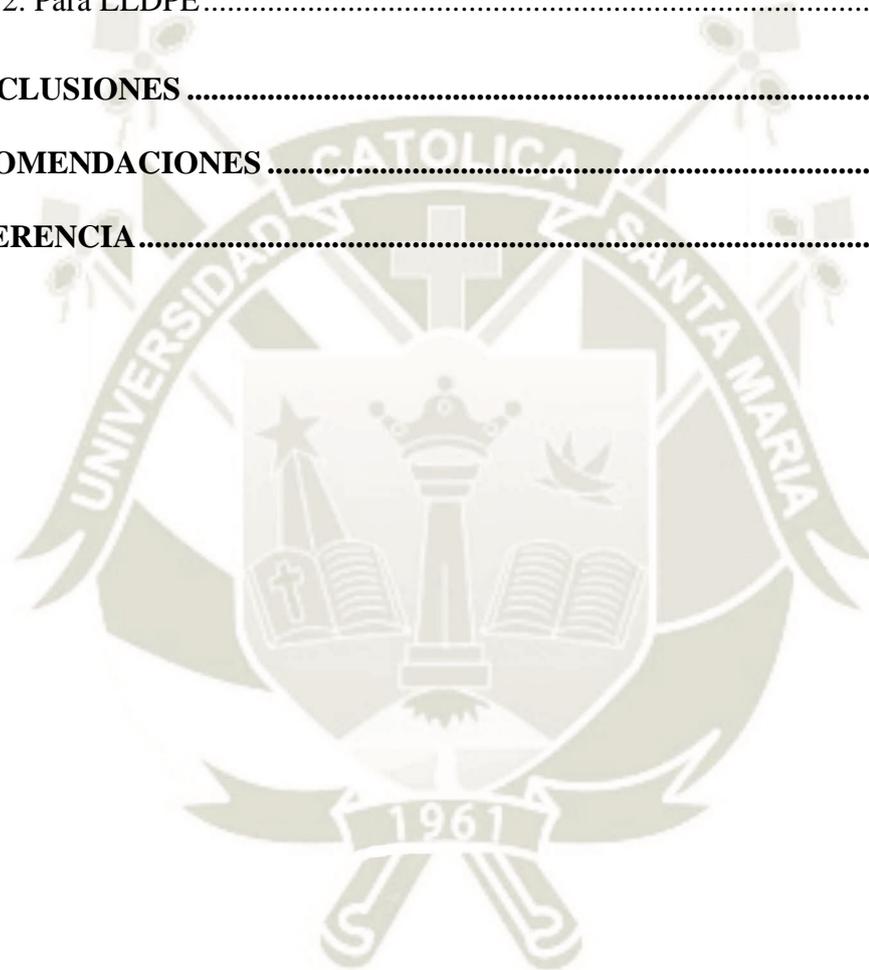
ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO I.....	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.1. Descripción de la situación problemática	20
1.2. Delimitación del problema.....	21
1.2.1. Pregunta principal.....	21
1.2.2. Preguntas secundarias.....	21
1.3. Objetivos.....	22
1.3.1. Objetivo general.....	22
1.3.2. Objetivos específicos.....	22
1.4. Hipótesis.....	22
1.5. Justificación.....	23
1.5.1. Límites.....	23
1.5.2. Alcances.....	23
CAPÍTULO II.....	24
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1. Antecedentes de la investigación locales	24
2.2. Antecedentes del investigación al nivel nacional.....	24

2.3. Antecedentes de la investigación al nivel internacional	24
2.4. Evolución histórica de las geomembranas	25
2.5. La empresa	26
2.5.1. Procesos mina	26
2.6. Lixiviación de cobre.....	27
2.6.1. Diseño de PAD de lixiviación	28
2.6.2. Parámetros de PAD de lixiviación.....	30
2.7. Geomembranas.....	34
2.7.1. Tipos de geomembrana.....	35
2.7.2. Geomembrana (HDPE) (Polietileno de alta densidad PEAD).....	35
2.7.3. Geomembrana de LLDPE (Polietileno de baja densidad PEBD).....	38
2.8. Instalación de geomembranas	39
2.8.1. Máquinas de desplegado.....	40
2.8.2. Soldadura de geomembranas	41
2.9. Controles de calidad en geomembranas	43
2.9.1. Prueba de resistencia a la perforación (ASTM D6241).....	43
2.9.2. Resistencia a la tracción (ASTM D 6392).....	44
2.10. Protectores anticorrosivos	45
2.10.1. Sikalastic 841	46
2.10.2. Factores que provocan la ruptura de las geomembranas	49
CAPÍTULO III	50
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	50
3.1. Tipo de investigación	50
3.1.1. Experimental.....	50
3.2. Variables	50

3.3. Procedimiento experimental.....	51
3.3.1. Obtención de Geomembrana y materiales	51
3.3.2. Proceso de Impermeabilización de Geomembranas	52
3.3.3. Proceso para determinar la resistencia a la tracción	54
3.3.4. Proceso para determinar la resistencia a la perforación.....	57
3.3.5. Procesamiento estadístico de análisis de datos	58
CAPÍTULO IV.....	63
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	63
4.1. Pruebas a Geomembranas de HDPE.....	63
4.1.1. Prueba de temperatura	63
4.1.2. Pruebas de resistencia a la tracción.....	64
4.1.3. Prueba de resistencia a la perforación.....	70
4.2. Pruebas a Geomembranas de LLDPE.....	73
4.2.1. Pruebas de resistencia a la tracción.....	73
4.2.2. Prueba de perforación LLDPE.....	75
CAPÍTULO V	77
5. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
5.1. Geomembranas de HDPE	77
5.1.1. Análisis 1, tracción geomembranas No prueba de temperatura.....	77
5.1.2. Análisis 2, tracción geomembranas Si prueba de temperatura	80
5.1.3. Análisis 3, análisis de la varianza	82
5.1.4. Análisis 4, perforación.....	85
5.2. Geomembranas de LLDPE	88
5.2.1. Análisis 1, tracción geomembranas No prueba de temperatura LLDPE	88
5.2.2. Análisis 2, tracción geomembranas Si prueba de temperatura LLDPE.....	90

5.2.3. Análisis 3, ANOVA para tracción de LLDPE.....	93
5.2.4. Análisis 4, Prueba de perforación LLDPE.....	96
5.3. Consideraciones económicas	98
5.4. Validación de hipótesis	99
5.4.1. Para HDPE.....	99
5.4.2. Para LLDPE.....	100
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	102
REFERENCIA.....	103



Lista de figuras

Figura 1 Pila lixiviación.	28
Figura 2 Disciplinas intervinientes en el diseño de PADs de lixiviación.....	29
Figura 3 PAD de lixiviación 4B	31
Figura 4 Estructura del PAD de lixiviación	33
Figura 5 Geomembrana lisa.....	37
Figura 6 Geomembrana texturizada	37
Figura 7 Geomembrana blanca en PAD de lixiviación Cuajone.....	38
Figura 8 Instalación de geomembrana.....	40
Figura 9 Soldadura por termofusión.....	41
Figura 10 Maquina extrusora.....	42
Figura 11 Prueba de resistencia a la perforación.....	44
Figura 12 Equipo para prueba de tracción.....	45
Figura 13 Aplicación de Sikalastic 841	46
Figura 14 Sustratos de la Poliurea	47
Figura 15 Termómetro digital	53
Figura 16 Medidas de muestra de geomembrana para tracción	54
Figura 17 Partes de la curva de tracción en geomembranas.....	55
Figura 18 Diferencia de la curva entre polietileno de alta y baja densidad.....	56
Figura 19 Diagramas fuerza desplazamiento.	57
Figura 20 Secuencia de experimentación	58
Figura 21 Análisis 1.....	59
Figura 22 Análisis 2.....	60
Figura 23 Análisis 3.....	60
Figura 24 Análisis 4.....	61

Figura 25 Análisis ANOVA	62
Figura 26 Muestras de geomembrana en solución, recubiertas.....	63
Figura 27 Geomembranas sumergidas, no cubiertas	64
Figura 28 Prueba de tracción Si cubierto Si prueba de temperatura.	65
Figura 29 Geomembranas no cubiertas sin tratamiento.	68
Figura 30 Muestras recubiertas no sometida a calor	69
Figura 31 Muestras listas para prueba de perforación.....	71
Figura 32 Prueba de resistencia a la perforación.....	72
Figura 33 Detalle de prueba de perforado	75
Figura 34 Comparación de datos de tracción	78
Figura 35 Comparación de datos si prueba de temperatura.	81
Figura 36 Ensayo de perforación HDPE	87
Figura 37 Resultados pruebas de tracción cubiertas vs no cubiertas.....	89
Figura 38 Datos para si prueba de temperatura LLDPE.....	91
Figura 39 Ensayo de perforación LLDPE	97

Lista de tablas

Tabla 1 Cuadro resumen capas de PAD	32
Tabla 2 Resumen datos PAD de lixiviación	34
Tabla 3 Características técnicas de geomembrana HDPE	36
Tabla 4. Resultados de diferentes ensayos para geomembrana LLDPE	39
Tabla 5 Cuadro de variables	51
Tabla 6 Tabla de toma de datos	54
Tabla 7 Prueba de tracción, Si recubierto Si prueba de temperatura.....	66
Tabla 8 Prueba de tracción, No recubierto Si prueba de temperatura.....	67
Tabla 9. No prueba de temperatura, Si recubrimiento.....	69
Tabla 10 No prueba de temperatura, No recubrimiento.....	70
Tabla 11 Resultados prueba de perforación.....	72
Tabla 12 Pruebas de tracción Geomembranas LLDPE, No prueba de temperatura.....	73
Tabla 13 Prueba de tracción LLDPE No prueba de temperatura.....	74
Tabla 14 Prueba de perforación LLDPE	76
Tabla 15 Datos cubiertas vs no cubiertas No prueba de temperatura.....	78
Tabla 16 Datos estadísticos HDPE No tratamiento térmico.....	79
Tabla 17 Prueba T-Student para geomembrana cubierta vs no cubierta o prueba de temperatura	79
Tabla 18 Datos cubiertas vs no cubiertas Si prueba de temperatura	80
Tabla 19 Estadísticos descriptivos para muestras que pasaron temperatura.....	81
Tabla 20 Prueba T para muestras que pasaron temperatura.....	82
Tabla 21 Estadísticos descriptivos Anova para HDPE.....	83
Tabla 22 Prueba de homogeneidad de varianzas.....	83
Tabla 23 ANOVA para HDPE	84

Tabla 24 Prueba de Bonferroni para HDPE	85
Tabla 25 Datos prueba de perforación.....	86
Tabla 26 Estadísticas de grupo	86
Tabla 27 Prueba T-Student para prueba de perforación HDPE.....	87
Tabla 28 Datos a analizar prueba con y sin revestimiento No prueba de temperatura...88	
Tabla 29 Estadísticos descriptivos cubiertas vs no cubiertas	89
Tabla 30 Prueba T-Student para LLPDE.....	90
Tabla 31 Resultados prueba de tracción si prueba de temperatura.....	91
Tabla 32 Estadísticos descriptivos pruebas de tracción LLDPE.	92
Tabla 33 Prueba T-Student para tracción Si prueba de temperatura.	92
Tabla 34 Datos para ANOVA (lb/pulg).....	93
Tabla 35 Estadísticos descriptivos.....	94
Tabla 36 Prueba de homogeneidad de varianzas.....	94
Tabla 37 ANOVA para LLDPE	95
Tabla 38 Bonferroni para datos de tracción de LLDPE	95
Tabla 39 Fuerza de rotura.....	96
Tabla 40 Estadísticos del descriptivos.....	97
Tabla 41 T-Student para perforación LLDPE	98
Tabla 42 Comparación de geomembrana vs recubrimiento	99

Lista de Apéndices

Apéndice A Prueba de perforado.....	108
Apéndice B Sanciones económicas por fugas o derrames.....	110



INTRODUCCIÓN

Nuestro país es rico en recursos naturales gracias a una diversidad de factores que nos pone en esta condición, entre esta riqueza natural destaca la de los minerales, con que se producen los principales metales que el mundo requiere para su desarrollo entre ellos el cobre. Según el ministerio de economía y finanzas la inversión minera llegó a su pico en el año 2013, concretándose ese año inversiones por casi 9 mil millones de dólares, desde entonces las inversiones en minería han ido disminuyendo hasta llegar a los 3334 millones de dólares en el 2016, registrándose desde el 2017 una ligera tendencia de crecimiento, en este marco de lenta recuperación, en el 2021 las inversiones mineras superaron los 5 mil millones de dólares, Ministerio de energía y minas (2022). Uno de los factores que frena el desarrollo de nuevos proyectos mineros es la percepción de la población de que la minería contamina, y entre los factores más temidos, están las pilas de lixiviación, al creer que el suelo será contaminado con ácido sulfúrico y este se filtrará al subsuelo contaminando aguas subterráneas, las que posteriormente contaminarán y matarán los cultivos de agricultores cercanos al proyecto. Esta es una idea equivocada en primer lugar por que la solución usada para lixiviar el mineral tiene una muy baja concentración de ácido sulfúrico, y además de esto los PADs de lixiviación son impermeabilizados con geomembranas, el cual es un material de alta resistencia y especialmente diseñado para estos trabajos, pero este material es relativamente nuevo en su uso y se están encontrando que por diferentes motivos podrían llegar a sufrir algunas grietas, es por eso que en la presente investigación se buscó la manera de poder reforzar este material sobre todo en áreas que podrían resultar sensibles a la rotura, y en la búsqueda de un material se encontró un material impermeabilizante de fuertes características de adherencia y además de gran capacidad a la resistencia a la corrosión,

y finalmente de propiedades mecánicas parecidas al material base la geomembrana, en la presente investigación se busca ver si efectivamente este material mejora las propiedades mecánicas de la geomembrana con el fin de hacerlo más resistente.



CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la situación problemática

Actualmente las empresas mineras tratan de llevar el proceso de lixiviación con la mayor seguridad posible desde el punto de vista del cuidado ambiental, siendo muy común al socializar sus proyectos mineros ante la comunidad, destacar la alta seguridad que brinda las geomembranas y el diseño de sus PAD de lixiviación, dando a entender que las filtraciones son casi imposibles. No obstante las geomembranas soportan grandes esfuerzos debido a la gran cantidad de material que hay sobre ellas, si a esto se suma algún error de cálculo en el diseño de ingeniería, falta de control de calidad en el proceso de instalación o una mala operación, esto puede ocasionar la disminución del tiempo de vida de las geomembranas hasta llegar a romperlas, como lo muestran las diferentes empresas dedicadas al servicio de detección de fugas en geomembranas. En general según un estudio desarrollado por empresas especializadas, Beck (2006); sobre la frecuencia de agujeros en geomembranas, se encontró que para las geomembranas instaladas con procesos de control de calidad estrictos, en promedio se pueden encontrar 2.5 fugas por hectárea y para los proyectos que no tienen control de calidad hasta 25 fugas por hectárea, de la misma manera en estudio realizado por Baldiga & Prota (2017), expuesta en la primera conferencia de geosintéticos en Chile, sobre un estudio desarrollado en 42 proyectos (2 218 924 m²) de instalación de geomembranas en Latinoamérica, se llegaron a conclusiones similares del estudio anteriormente mencionado; con un promedio de 10 fugas por hectárea, entre los 42 proyectos evaluados, como podemos ver no es tan cierto que las geomembranas son perfectas, existiendo mucho espacio para mejorar y ensayar métodos de hacer que estas geomembranas sean cada vez más seguras para el medio ambiente no permitiendo

filtraciones es por eso que en la presente investigación se analizara la mejora de las propiedades mecánicas, tras la aplicación de un aditivo especial.

1.2. Delimitación del problema

Los PADs de lixiviación son grandes montículos de mineral de cobre, que se depositan en áreas planas preparadas con una serie de medidas de seguridad como apisonamiento del área, colocación de una capa de material fino como arcilla y finalmente las geomembranas todo con el fin de evitar las filtraciones, pero como ya se mencionó por diferentes motivos las rupturas siempre aparecen. Desde el punto de vista técnico la geomembrana soporta desde 20 hasta 160 tn de mineral por metro cuadrado, este alto esfuerzo sumado a otros factores puede terminar por quebrar la geomembrana por eso se considera importante reforzarla, al menos en puntos críticos, que por lo general en los PADs de lixiviación se usa de 2 mm de espesor. Por otro lado, la evolución de los materiales de recubrimiento cada vez con mayores propiedades mecánicas y anticorrosivas nos invitan a usarlos en áreas donde sea de nuestro mayor beneficio.

1.2.1. Pregunta principal

¿Es factible el uso de una sustancia impermeabilizadora para tener mayor seguridad al momento de prevenir rupturas de la geomembrana, con el fin de prevenir fugas de fluidos de lixiviación hacia el subsuelo?

1.2.2. Preguntas secundarias

- ¿Cuál será la Resistencia a la Tracción en una geomembrana de ¹HDPE y ²LLDPE impermeabilizada?
- ¿Cuál será la Resistencia al Temperatura en una geomembrana de HDPE Y LLDPE impermeabilizada?
- ¿Cuál será la Resistencia al Perforación en una geomembrana de HDPE Y LLDPE impermeabilizada?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la factibilidad del uso de una sustancia impermeabilizadora de alta resistencia, impregnada en la geomembrana, con el fin de mejorar el desempeño de esta para evitar posibles fugas de líquido lixivante.

1.3.2. Objetivos específicos

- Calcular la resistencia a la tracción con y sin la sustancia impermeabilizadora en los dos tipos de geomembrana.
- Calcular la resistencia a la temperatura con y sin la sustancia impermeabilizadora en los dos tipos de geomembrana.
- Calcular la resistencia a la perforación¹ con y sin la sustancia impermeabilizadora en los dos tipos de geomembrana.

¹Es importante remarcar que con el término “perforación” nos referimos a la prueba de perforación que es una prueba importante que se realiza a diversos materiales con el fin de caracterizar su resistencia. Al indicar dos tipos de geomembrana nos referimos a las geomembranas de polietileno de alta densidad HDPE, como para geomembranas de polietileno de baja densidad LLDPE

1.4. Hipótesis

Mediante la utilización de la sustancia impermeabilizadora se optimizara el desempeño de la geomembrana, debido a que esta sustancia aumentara la resistencia a la tracción, y perforación, dada las exigentes condiciones de trabajo de las geomembranas.

1.5. Justificación

Es importante tomar las máximas medidas de prevención en cuanto a evitar la contaminación ambiental, por esta razón se requiere tener la máxima certeza que no exista ningún tipo de filtración al suelo y que el tiempo de vida de las geomembranas sea óptimo por estos motivos la presente investigación intentara solucionar este problema, mediante la utilización de una sustancia impermeabilizadora.

De esta manera se podrá evitar la contaminación del suelo, aguas subterráneas y por ende las personas evitando conflictos con las comunidades cercanas a la zona de influencia de una minera.

1.5.1. Límites

Es poca la información que se puede recabar de parte de los organismos oficiales del estado como son OEFA, debido en parte a que encontrar fugas en geomembranas por métodos geo eléctricos, es una tecnología aun en desarrollo llegando a encontrar al momento fugas de hasta 10 metros por encima de la geomembrana, pero es conocido que los PAD de lixiviación pueden llegar a tener entre 50 a 100 y hasta 200 metros de altura.

1.5.2. Alcances

- La presente tesis explora y desarrolla los procesos de lixiviación con geomembranas de HDPE y LLDPE.
- La investigación abarca ensayos y controles aplicados a las geomembranas HDPE y LLDPE con y sin el uso de agentes impermeabilizantes.
- Esta investigación abarca solo los procesos de lixiviación con ácido sulfúrico que es el ácido más usado en los procesos de lixiviación de cobre.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación locales

En la investigación desarrollada en la Universidad Católica de Santa María UCSM, denominada “Caracterización de las propiedades mecánicas de geotextiles de polipropileno no tejido mediante ensayos de tracción y elongación normalizados en una maquina universal para polímeros”. Se realiza el análisis de propiedades mecánicas de los geosintéticos, para lo cual se desarrolla pruebas de tracción y finalmente se desarrollan simulaciones sobre el comportamiento de los geotextiles, demostrando que efectivamente son capaces de soportar las fuerzas a las que serán sometidas, el ensayo de tracción al final da como resultado 4.88 Mpa y el de punzonamiento da como resultado 462.6 N, datos corroborados con la simulación. (Cárdenas Cuentas, 2015)

2.2. Antecedentes del investigación al nivel nacional

En la investigación denominada “Resistencia al corte y desgarro en geomembrana HDPE”. Tesis para optar el título profesional en la Universidad Privada Del Norte se desarrollan pruebas en un equipo Indentech, trabajandose pruebas de tracción para muestras de geomembranas que pasaron por un proceso de soldadura tras el análisis de datos se concluyó que la temperatura óptima para soldar es de 260 a 270°C en este rango de temperaturas se obtiene la mejor resistencia a la tracción (Llanos Chuquiruna & Llanos Chuquiruna, 2019).

2.3. Antecedentes de la investigación al nivel internacional

Lodi evaluó las geomembranas sumergidas en lixiviados por un periodo de 120 días a 23 y 50° C, en ambos casos se pudo evidenciar un aumento del alargamiento en la prueba de tracción, también se realizaron pruebas de índice de fluidez en las cuales se observó una

afectación aumentando este índice en 75.2% para los lixiviados lo que evidenció que efectivamente existe una afectación a su estructura (Lodi, Bueno, & Hamada, 2013).

Lavoie y Bueno evaluaron el impacto de una solución ácida derivada del azúcar, para lo cual sumergieron en la solución muestras de geomembrana de HDPE, por un periodo de 120 días a una temperatura de 50°C, además también se sumergió en solución alcalina luego de evaluar las propiedades de tracción se verificó una disminución del 34% en estas pruebas y en las muestras sumergidas en solución alcalina se vio una disminución del 40% en la prueba de tracción (Lavoie & Bueno, 2013).

Morsy y Rowe evaluaron cual fue el impacto a la geomembrana tras sumergir geomembranas a 85°C en agua clorada por un periodo de tiempo de 20 días para muestras de HDPE y LLDPE, observando que las muestras de HDPE sufrió mayor daño sobre todo en lo referente al porcentaje de oxidación, concluyendo que efectivamente el agua clorada tiene un fuerte impacto en la capacidad en la oxidación o envejecimiento de la geomembranas sobre todo de HDPE (Morsy & Rowe, 2016).

Rowe y Shoaib investigaron sobre cuál es el efecto de la soldadura sobre las geomembranas para lo cual se sumergieron muestras de geomembrana de HDPE en lixiviados a temperaturas de 40, 65, 75, 85°C luego de realizar los análisis respectivos se concluyó que los puntos de soldadura como tal no sufrieron mayor afectación, pero las zonas cercanas a los puntos de soldadura si sufrió oxidación o envejecimiento (Rowe & Shoaib, 2017).

2.4. Evolución histórica de las geomembranas

En EEUU en los años 1970 se desarrollan los primeros proyectos de lixiviación de mineral de cobre en botaderos, proyectos que se efectuaron sin geomembranas solo con contención natural, con la lixiviación de mineral de oro con cianuro es que en los años 1980 se hace común el uso de geomembranas, a la vez en Chile en los mismos años comenzó la

aplicación de lixiviación de cobre a escala industrial, teniendo como base la geomembrana Smith & Breitenbach (2007). Como es conocido en los últimos años, cada vez más el tema del cuidado medio ambiental es un tema sensible por lo que la seguridad ambiental de los PADs de lixiviación ha evolucionado junto a los controles de calidad de posibles filtraciones; pasando de los diseños en los que bastaba una geomembrana a los diseños usados por las actuales empresas mineras como Southern en los que se tiene hasta 4 capas; constituida de 2 capas de geomembrana, 1 capa de arcilla y una de grava Salas (2019). Pese a estas mejoras que implican costos extras, las filtraciones continúan, prueba de esto son las muchas empresas dedicadas a detectar rupturas en las geomembranas mediante diferentes técnicas como la pruebas geo eléctricas, el Método Lanza de Agua, el Método Bipolar, etc.

2.5. La empresa

En la presente, no se hará referencia a una empresa minera en particular, si no más bien apunta a un proceso en específico, y este es el proceso de lixiviación, el mencionado no solo es propio del cobre si no también del oro pero con claras diferencias operacionales la principal es que el cobre trabaja con agua acidulada con ácido sulfúrico y el oro con cianuro, pero esto también está definido en el título, refiriéndonos exclusivamente a pilas de lixiviación de cobre de cualquier empresa minera, que es en donde podría tener impacto el presente estudio. Solo con fines de poder tener un punto de referencia sobre los parámetros de operación y diseño es que en la presente investigación citaremos datos públicos de la empresa minera que opera en nuestra ciudad, además para tener mejor idea se resaltaran algunos datos del proceso en general.

2.5.1. Procesos mina

Actualmente en mina cerro verde se trata mineral con leyes en promedio para el año 2021 de 0.35 % la que cuenta con dos plantas concentradoras la primera (C1) construida en 2005 y la segunda(C2) construida en 2015, ambas actualmente están procesando casi 400

mil toneladas por día, y para conseguir esto en voladura se mueven 1 millón de toneladas cada día, de los cuales el mayor porcentaje es para las plantas concentradoras y la otra parte que se especifica más adelante es para lixiviación, para lograr esto actualmente se cuenta con 145 camiones, 7 palas y 15 perforadoras de las marcas más conocidas del mundo, que permiten mover estas cantidades de material.

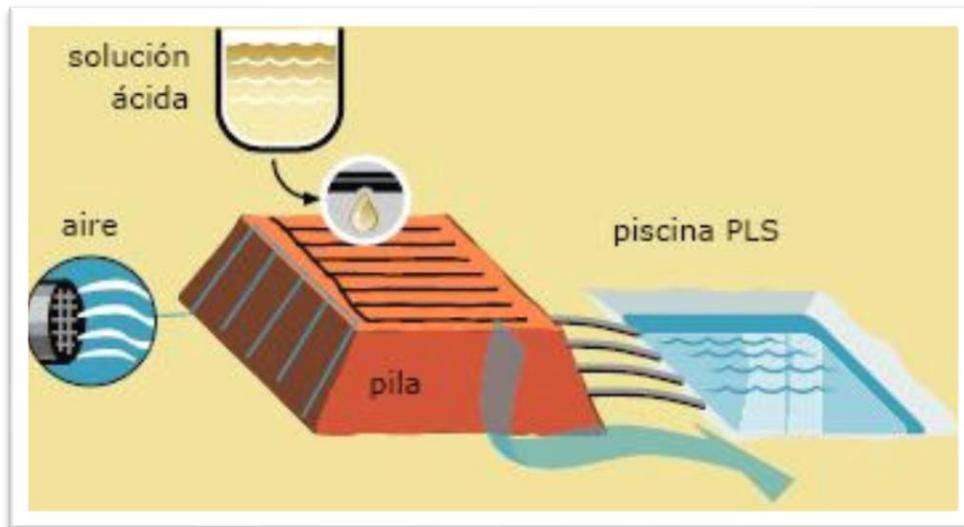
2.6. Lixiviación de cobre

Según la Real Academia Española (2021), lixiviar es tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.

La lixiviación es un genial proceso mediante el cual extraemos el metal valioso en forma de solución de un puñado de tierra el cual contiene a nuestro metal molecularmente mezclado con un sinnúmero de elementos no valiosos, este puñado de tierra es el mineral valioso que se extrae de mina, este mineral puede ser óxidos de cobre como puede ser malaquita, azurita e incluso algunos sulfuros de cobre. La sustancia de riego por lo general es agua acidulada con ácido sulfúrico a una concentración de 10 g/lit en promedio. El material es irrigado por un tiempo de 2 meses aproximadamente y el objetivo es extraer el cobre de la roca en forma de solución, solución que es recolectada dado que absolutamente todo el PAD está constituido en su base por una geomembrana que no permite que los líquidos lixiviados se filtren al interior de la tierra, sino más bien sean recolectados para luego ser conducidos a la planta de electrodeposición. Los mencionados PAD de lixiviación pueden ser fijos o dinámicos, los dinámicos que son los más comunes son aquellos en los que luego del periodo de lixiviación el material es extraído de la cancha de lixiviación y conducido a botaderos para colocar un nuevo material para iniciar un nuevo ciclo de lixiviación.

Figura 1

Pila lixiviación.



Nota. La figura representa un PAD de lixiviación regada por goteo con solución ácida de ácido sulfúrico además de ventilación mecánica para mejor cinética. Tomado de Tapia (2016, pág. 12).

La lixiviación es un proceso sencillo el cual consta de irrigar como si se tratara de un campo agrícola (por goteo o aspersión) el mineral previamente preparado en glómeros o a una granulometría entre 1.5 a $\frac{3}{4}$ de pulgada, dispuesto sobre grandes espacios planos, preparados para este fin a los que se denominan PAD de lixiviación, como vemos en la Figura 1.

2.6.1. Diseño de PAD de lixiviación

Los PADs de lixiviación se diseñan en función a muchas variables dentro de las cuales la principal será la cantidad de mineral tratado, e intervienen una serie de disciplinas como la topografía, dado que se trata de un área muy grande el terreno geoméricamente debe ser estudiado detalladamente para poder costear cuanto material se deberá mover, con el fin de obtener el área plana; la geología y geotecnia dado que es importante ver que sucederá en caso de lluvias torrenciales como se gestionara las ingentes cantidades de agua que pueden aparecer de un momento a otro o los posibles cuerpos de agua que se pueden encontrar en el subsuelo, la importancia de detectar posibles fallas que estén a pocos metros

de la superficie, que conduzcan al colapso repentino por debajo de nuestro PAD; la ingeniería de minas para poder realizar las voladuras necesarias que nos permitan tener el terreno plano además de la gran cantidad de material que se debe de mover; la ingeniería hidráulica debido a las muchas bombas, tuberías, canales, conexiones, etc. Que se deben instalar con el fin de gestionar sin fallas ni derrames la gran cantidad de fluidos generados, la ingeniería de sistemas y electrónica para controlar todo esto desde salas de control y tener en tiempo real todas las variables a la mano para tomar decisiones, finalmente y talvez más importante todos los diseños deben de pasar por el análisis ambiental-social que generara la construcción del proyecto.

Figura 2

Disciplinas intervinientes en el diseño de PADs de lixiviación



Nota. El esquema representa algunas de las diferentes disciplinas que rodean al diseño y construcción de un PAD de lixiviación. Elaboración propia.

Todos las disciplinas anteriormente citadas que resumimos en la Figura 2, deben estar coordinadas por un jefe de proyecto, que tome en cuenta todas las consideraciones desarrolladas, además que tenga la suficiente experiencia, capacidad y liderazgo con el fin de sacar adelante el proyecto de diseño o construcción del PAD, que por lo general se trata

de un profesional de ingeniería de minas, dado que trata de una de las muchas partes que componen una mina.

2.6.2. Parámetros de PAD de lixiviación

Como para tener una mejor idea de los parámetros, dimensiones y medidas de PADs de lixiviación tomaremos como ejemplo las dimensiones de un PAD de lixiviación construidos en las cercanías de nuestra ciudad para una de las empresas mineras de cobre más grandes de nuestro país.

El mencionado PAD está ubicado Knight Piésold Consultores (2010) sobre una área total de 1 700 000 m² y llegara a tener 140 m de altura para lo que será necesario contar con pozas de colección de 100 000 m³ donde se almacene la solución PLS, que es la solución enriquecida de cobre, además para contener en caso de emergencia aguas de lluvia, la mencionada estructura está diseñada para tratar 212 millones de toneladas de las cuales el 80 % será de material sulfurado y el 20% será óxidos de cobre además se estima tratar minerales provenientes de dos yacimientos diferentes.

2.6.2.1. Tiempo de duración

Se estima según Knight Piésold Consultores (2010) que el PAD pueda recibir mineral desde noviembre del 2010 hasta el año 2027 y que será operado en dos etapas la primera que tomara 3 años, durante este periodo se realiza el acondicionamiento del terreno y el tratamiento de un primer lote de 48.2 millones de toneladas, en la segunda etapa se prepara los 63 mil hectáreas restantes con y el procesamiento de 163.8 millones de toneladas, todo esto planificado en función a la capacidad productiva de mina. Todo esto con una inversión de 247 millones de dólares, en la figura 3 vemos el mencionado.

Figura 3*PAD de lixiviación 4B*

Nota. PAD 4B de Sociedad minera cerro verde. La figura se aprecia la colocación de geomembrana para posteriormente disponer el mineral. Tomado de (Sociedad minera cerro verde, 2017).

2.6.2.2. Impermeabilización

Para lograr impermeabilizar el PAD, en primer lugar se retiró 1.7 millones m³ de material sobrante y se rellenó con 725 mil m³ de relleno con ciertas condiciones y casi 700 mil m³ de relleno estructural, como segunda capa se colocó material impermeable es decir un material que no permita el paso de fluidos por un espesor de 300 milímetros, con una capa de 100 milímetros superior es decir lo que tiene contacto con la geomembrana con una geomembrana lo más fina posible, con el fin de que no dañe la geomembrana la mencionada capa debe estar altamente compacta. En otros proyectos esta última capa consta de material arcilloso debido a su baja permeabilidad, pero en el presente consta de material ya lixiviado proveniente del PAD anterior.

Finalmente se coloca una capa de geomembrana de polietileno de baja densidad con textura en un lado y de un espesor de 2 mm, la geomembrana se instaló con la cara texturada

hacia el lado del suelo compacto con el fin de tener una excelente resistencia al corte, además se instalará geotextil en las partes donde la geomembrana tenga que soportar mayor presión, instalándose más de 1.6 millones de m² en geomembrana entre la primera y segunda etapa y 400 mil m² de geotextil.

Por sobre la geomembrana tenemos el sobre revestimiento que consta de dos capas una de 600 mm cuya función es exclusivamente proteger la geomembrana y otra de 1000 mm que tendrá la función de servir como una capa que permita el paso de la solución y lo derive hacia las canales de colección, el material para esta capa de protección de la geomembrana de 60 mm será material ya lixiviado del PAD anterior, encima de todas estas capas recién se disponen el material a lixiviar como vemos en la Figura 4.

Tabla 1

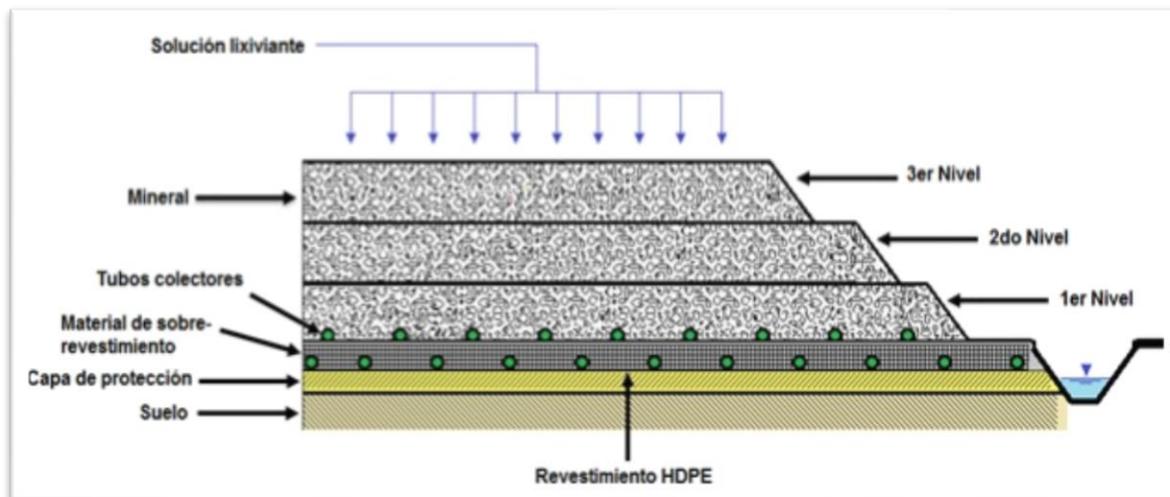
Cuadro resumen capas de PAD

Capas de PAD	Descripción
Relleno base	
Material extraído de base, para igualar	725 mil m ³
Material de relleno	1.7 millones m ³
Capa 1 material impermeable	300 mm
Capa 2 material impermeable que estará en contacto con geomembrana	100 mm
Geomembrana 2 mm	1.6 millones de m ²
Capa de protección de geomembrana	60 mm
Capa de percolación	1000 mm
Material para lixiviar	160 m de altura, en 20 capas de 8 m

Nota. En la tabla podemos apreciar las principales características de la construcción del PAD 4B de lixiviación, de la empresa SMCV, Elaborado en base a información expuesta anteriormente.

Figura 4

Estructura del PAD de lixiviación



Nota. Esquemas de niveles en el PAD de lixiviación en el que se aprecia 3 niveles de mineral, contenido por 3 capas protectoras del suelo una capa de arcilla compacta, geomembrana y material sobre la geomembrana, tomado de (Broggi, 2015).

2.6.2.3. Operación

El mineral se dispondrá en el PAD de lixiviación en tramos de 20 capas, de 8 m de altura cada uno, las áreas para colocar el mineral irán creciendo debido a que el PAD se encuentra como vimos en la imagen anterior en una quebrada, por lo que la primera capa tendrá un área de 343 646 m² hasta llegar a la última capa la cual tendrá un área de 666 213 m²; completando una altura de 160 m.

Como podemos ver el diseño de una pila de lixiviación implica el conocimiento de muchas disciplinas y su estructura en si está constituida por diferentes capas las que tienen como principal objetivo no permitir que el líquido lixivante ingrese al subsuelo en la tabla 2, vemos un resumen de lo explicado anteriormente.

Tabla 2

Resumen datos PAD de lixiviación.

Actividad	Observación
Tiempo de lixiviación	17 años
Cantidad de material lixiviado	212 millones de toneladas
Costo total	247 millones de dólares
Total, geomembrana utilizada	1.6 millones de m ²

Nota. Resumen basado a lo expuesto anteriormente en el que se detalla los principales datos resumen sobre el PAD de lixiviación 4B de SMCV, Tomado de (Knight Piesold Consulting, 2008)

2.7. Geomembranas

Las geomembranas son láminas de muy baja permeabilidad que se emplean como barreras hidráulicas, están hechas de polímero termoplásticos que tienen diversos espesores se encuentran en rollos de láminas. Las técnicas de termofusión y extrusión de soldadura han sido desarrolladas específicamente para unir trozos de geomembranas entre sí.

La función principal que cumplen las geomembranas es: “contener los materiales y sustancias, previniendo el flujo de líquidos y vapores. Su baja permeabilidad asegura una estanqueidad casi perfecta, por eso, estos son uno de los geosintéticos más solicitados”. Siendo la geomembrana HDPE, las más solicitada según IGC (2018). Como se ha mencionado, uno de los usos más comunes de la geomembranas es el revestimiento de áreas destinadas a la contención de líquidos y suelos químicamente peligrosos. En la minería el proceso común suele ser el diseño de las pilas de lixiviación para la extracción del mineral. “El uso de las geomembranas en la minería resaltan la impermeabilización de los PADs de lixiviación, diques de contención de residuos mineros, depósitos de salmueras y depósitos de relaves. “Innovación en geosintéticos y construcción” (IGC, 2020).

2.7.1. Tipos de geomembrana

Las geomembranas al momento de su fabricación se dividen claramente en dos tipos: las de alta densidad y las de baja densidad o también conocidas como LLDPE (Polietileno lineal de baja densidad), LLDPE (Geomembrana de baja densidad) y HDPE (Membrana de polietileno de alta densidad) como vemos clasificados por su densidad, de todos estos el más comercial usado es el HDPE llegando su uso al 95%, aunque en los PADs se prefiere usar LLDPE, por su mejor resistencia multiaxial.

2.7.2. Geomembrana (HDPE) (Polietileno de alta densidad PEAD)

Este tipo de geomembrana se caracteriza especialmente por su alta resistencia tanto desde lo químico por su alta resistencia a la corrosión como desde lo físico debido a sus rígidas propiedades mecánicas, además también tiene una alta resistencia al ataque de la radiación solar debido a su alto contenido de antioxidantes que la hacen muy fuerte a la luz ultravioleta, tal vez su relativa rigidez se puede identificar como su debilidad dado que no se amolda con facilidad a superficies irregulares, por su espesor se puede encontrar en el mercado de diferentes tipos desde 0.5 hasta los 5 mm, según su superficie este tipo de geomembrana existen de diferente tipo según Geosynthetic Institute (2019). En la Tabla 3 presentamos algunas de sus características técnicas.

Tabla 3

Características técnicas de geomembrana HDPE.

LLDPE (2 mm)			
Ensayo realizado	Norma		Unidad
Densidad	D 792	0,94	g/cm ³
Resistencia en el punto de rotura	ASTM D 6693 Tipo IV	53	KN/m
Elongación de ruptura	ASTM D 6693	700	%
Resistencia al rasgado	ASTM D 1004	249	N
Resistencia a la punción	ASTM D 4833	640	N
Contenido de negro de humo	ASTM D 1603	2.3-3.0	%
Tiempo de inducción oxidada	ASTM D 3895	100	min
Envejecimiento en horno 85 °C (90 días)	ASTM D 5721	55	%

Nota. Principales características mecánicas de geomembrana de HDPE, según pruebas realizadas por los fabricantes Adaptado de Emareza (2018). ASTM. Siglas en ingles de Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales.

Como podemos ver de la tabla anterior las propiedades mecánicas de la geomembrana HDPE, está definido por los diferentes ensayos mencionados en la primera columna los que se rigen a las normas ASTM de la columna 2, los valores se presentan en la columna tres y finalmente las unidades en la cuarta columna, podemos destacar los 53 kn/m para el ensayo de tracción y la elongación de rotura de 700 %.

- a) Geomembrana HDPE lisa: Esta lamina presenta ambas caras lisas por lo que es ideal para revestimiento industrial.

Figura 5

Geomembrana lisa



Nota. Geomembrana lisa de HDPE, ideal para trabajos en Pilas de lixiviación Tomado de Emaresa (2018)

- b) Geomembrana HDPE texturizada: Una de las caras presenta superficie rugosa, esto ayuda a que la fijación del material sea mayor debido al mayor coeficiente de fricción.

Figura 6

Geomembrana texturizada



Nota. La geomembrana texturizada es mas usada en áreas donde existe un cierto grado de inclinación de Emaresa (2018)

- c) Geomembrana HDPE blanca: Según el diseño el color blanco permite reflejar la radiación solar, lo que mejora sus propiedades de resistencia a la luz ultravioleta, en la

Figura 7 vemos una de estas geomembranas en servicio en el PAD de una conocida empresa minera de nuestro país.

Figura 7

Geomembrana blanca en PAD de lixiviación Cuajone.



Nota. Pilas de lixiviación con geomembrana blanca, Esta geomembrana tiene mejor resistencia a exposición a la intemperie. Tomado de Southern Copper (2018).

d) Geomembrana HDPE con capacidad conductiva: Este tipo de geomembrana tiene la capacidad de conducir la energía eléctrica debido a una fina capa de carbón conductor de energía eléctrica, lo que permite detectar orificios mediante pruebas basadas en arco eléctrico.

2.7.3. Geomembrana de LLDPE (Polietileno de baja densidad PEBD)

Este tipo de geomembrana presenta como principal ventaja su flexibilidad, esta resistencia extra le da el 2 a 3% de negro de humo que tienen este tipo de geomembrana, además también se puede elegir entre lisa o texturada y existe en el mercado en diferentes espesores similares a las geomembranas de HDPE y como ya se indicó uno de sus principales usos son los PADs de lixiviación debido a su adaptabilidad al terreno.

Tabla 4.

Resultados de diferentes ensayos para geomembrana LLDPE

LLDPE (2 mm)			
Ensayo realizado	Norma		Unidad
Densidad	D 792	0,94	g/cm ³
Resistencia en el punto de rotura	ASTM D 6693 Tipo IV	16	KN/m
Elongación de ruptura	ASTM D 6693	250	%
Módulo al 2%	ASTM D 5323	840	N/mm
Resistencia al rasgado	ASTM D 1004	200	N
Resistencia a la punción	ASTM D 4833	400	N
Resistencia	ASTM D 5617	30	N

Nota. En esta tabla podemos ver las propiedades mecánicas de la geomembrana LLDPE según diferentes pruebas ASTM, tomado de Emaresa (2018).

En la Tabla 4 podemos ver los resultados para diferentes ensayos sobre propiedades mecánicas y otras, para las geomembranas, estos parámetros resultan importantes al momento de comprar estas geomembranas es por eso que los fabricantes adjuntan siempre a sus productos estas mediciones, de las diferentes medidas podemos destacar el valor de resistencia al punto de rotura que es de 16 KN/m, el cual es bastante menor al de HDPE además de la elongación al punto de rotura que en este caso es de 250 %, también tenemos la resistencia a la punción que es de 400 N.

2.8. Instalación de geomembranas

Para la instalación de geomembranas es importante tomar en cuenta varios aspectos como la orientación de la geomembrana dado que no es igual el sentido longitudinal que el sentido transversal además de ver los traslapes; los equipos a utilizar debido a que si se usa máquinas y equipos muy pesados estos podrían dañar la geomembrana; el clima debido a

que fuertes vientos podría complicar la instalación o las lluvias podrían ponernos en mayores dificultades por lo que es muy importante tomar en cuenta el tiempo, como ya fue revisado la superficie tiene que estar totalmente plana y no debe existir elementos puntiagudos que puedan cortar incluso se debe tener cuidado con el EPP de los trabajadores desde los zapatos hasta herramientas cortantes. Al ser la geomembrana un elemento inflamable está prohibido fumar o encender algún tipo de fuego en zonas cercanas.

2.8.1. Máquinas de desplgado

Al instalar una geomembrana estas vienen en grandes rollos por lo que es importante la ayuda de un equipo que nos ayude a colocarlo en el lugar donde se va a instalar y a la vez nos ayude a desenrollar la geomembrana. En la Figura 8 podemos ver uno de estos equipos ayudando a los operadores a estirar los grandes rollos de geomembranas.

Figura 8

Instalación de geomembrana.



Nota. Excavadora de oruga con elementos adaptados para desenvolver la geomembrana. Tomado de Omali (2020).

Por lo general estos son brazos hidráulicos en el que se instala una tubería que carga el rollo de geomembrana este brazo hidráulico puede ser de tractores, o de camiones grúa como vemos en la imagen anterior.

2.8.2. Soldadura de geomembranas

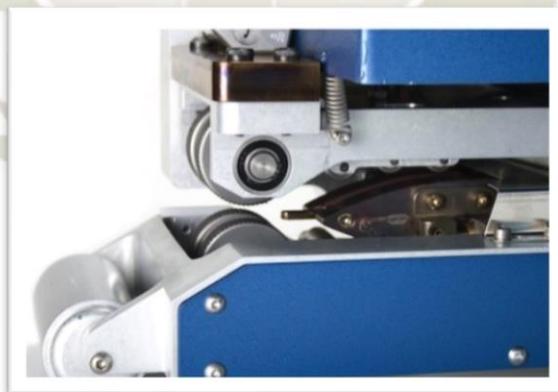
Los paneles que se despliegan deben ser soldados en la misma jornada laboral además de ser asegurados con sacos terreros, existen diferentes formas de unir las geomembranas en el siguiente título revisamos las principales técnicas. Para soldar geomembranas existen dos procedimientos conocidos el primero es mediante termofusión para lo cual se usa el equipo cuña, y una segunda forma que es la extrusión para lo que se utiliza aparte de material además de la máquina extrusora.

2.8.2.1. Soldadura por termofusión

La soldadura por termofusión se utilizaba para unir grandes tramos como es la unión de una lámina con otra, mas no para realizar pequeños trabajos de detalle o parchar pequeñas áreas. La máquina de termofusión trabaja con presión y temperatura con lo que se logra una soldadura confiable sencilla y rápida.

Figura 9

Soldadura por termofusión



Nota. Máquina de soldadura de geomembrana mediante termofusión, tomado de Tecnologías en soldadura plástica (2018).

En la Figura 9 podemos ver un equipo de soldadura por termofusión el cual sirve para unir las geomembranas según lo explicado anteriormente.

Para realizar la soldadura por termofusión es importante tomar en cuenta algunas recomendaciones entre las más importantes tenemos:

- a) El área de soldado debe estar limpia de tierra algún elemento contaminante o agua.
- b) Las soldaduras no se deben dejar a medio terminar es importante que al unir dos pliegues se terminen dado que por acción del viento se puedan generar fisuras en costuras incompletas.
- c) Cuando se esté realizando la soldadura no debe haber tensiones debido a que pueden ser puntos de inicio de fracturas además la soldadura debe ir siempre en el mismo sentido que al flujo.

2.8.2.2. *Soldadura por extrusión*

La característica más importante de este tipo de soldadura es el aporte de material para lograr la unión soldada, la soldadura por extrusión como se indicó se utiliza más para parchados o para unir nuevos trozos de geomembrana a estructuras ya instaladas.

Figura 10

Maquina extrusora



Nota. En la imagen se ve un operador realizando soldadura por extrusión en geomembrana, Tomado de Aristegui maquinaria (2021).

Como vemos en la Figura 10, el material de aporte es una varilla plástico que se calienta y sirve de elemento soldante, el traslape mínimo para realizar una reparación debe ser de 15 cm y se debe tener cuidados de limpieza para no contaminar la soldadura.

2.9. Controles de calidad en geomembranas

Existen diferentes tipos de ensayos de control de calidad tanto para asegurar la calidad de la geomembrana en su proceso productivo cómo la calidad de las uniones en el proceso de soldadura, en ambos casos existen ensayos destructivos y no destructivos y se tiene muchas pruebas en los diferentes sistemas de medición sea ASTM norma UNE o ISO, etc en el presente trabajo nos centraremos en algunas pruebas de control de calidad para verificar las propiedades mecánicas de la geomembrana.

2.9.1. Prueba de resistencia a la perforación (ASTM D6241)

Esta prueba ASTM D6241 (2021) se denomina prueba estándar para resistencia a la perforación estática de geotextil y productos relacionados con geotextil se desarrolla utilizando una sonda de 50 mm en la que es instalada un elemento que puede ejercer presión constante y que a la vez podamos medir la fuerza y desplazamiento aplicado, la prueba se desarrolla para medir la presión de rotura de la geomembrana el amplio diámetro proporciona información sobre la fuerza multidireccional esta es una prueba muy usada entre compradores y vendedores dado que proporciona información certera sobre la calidad y durabilidad del producto, como vemos en la siguiente imagen.

Figura 11*Prueba de resistencia a la perforación*

Nota. Elemento para la prueba de ruptura de la geomembrana, ASTM D6241 tomado Eieinstrument (2020)

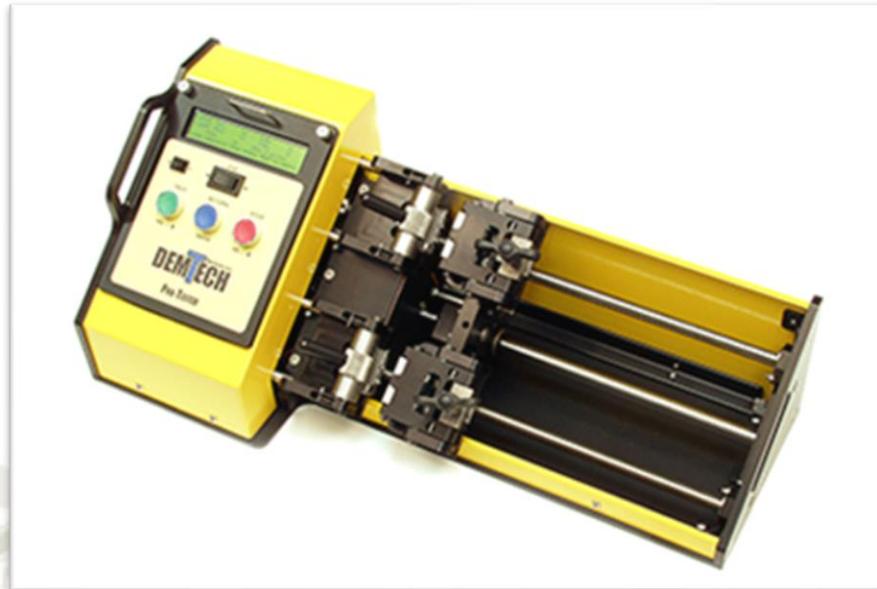
En la Figura 11 podemos ver un elemento normalizado para realizar la prueba de perforación que consta de un elemento inferior que sostiene a la geomembrana mediante pernos y por la parte superior una segunda pieza que descende hasta romper la geomembrana registrándose la medida en el punto de rotura.

2.9.2. Resistencia a la tracción (ASTM D 6392)

La norma ASTM D 6392, esto debido fundamentalmente a la disponibilidad del equipo la mencionada prueba mide resistencia a la tracción sobre todo de uniones soldadas pero en nuestro caso se tomarán nota de la tracción que soporta la muestra antes de deformarse sin llegar a la ruptura para lo cual se tomará nota del tiempo y la deformación la información es proporcionada por el equipo, además el equipo también nos da la medición sobre la tracción en un determinado tiempo o elongación pudiendo desarrollar un diagrama sobre estas variables las medidas de las muestras se tomarán según lo indica la norma y la velocidad de tracción será también según indica la norma de 2 pulgadas por minuto.

Figura 12

Equipo para prueba de tracción.



Nota. Equipo para realizar pruebas de ruptura de geomembrana (Demtech, 2021).

En la Figura 12, podemos ver un equipo para el registro de la tensión según fuerza aplicada, con este equipo podemos registrar la tensión que soporta una geomembrana según el fenómeno que queremos registrar, pudiendo ser, la tensión de fluencia, de rotura de soldadura de geomembrana o el comportamiento de la geomembrana a la aplicación de una determinada fuerza.

Según la norma las probetas deben tener una pulgada de espesor por 6 pulgadas de longitud en el cual se usarán geomembrana de 2 mm, además como ya se indicó la prueba se desarrolla a una velocidad de 2 pulgadas por minuto para los dos tipos de membranas tanto la geomembrana de alta densidad HDPE como la geomembrana de baja densidad LLDPE.

2.10. Protectores anticorrosivos

En el mercado existen diferentes tipos de protectores anticorrosivos, antihumedad, antisalitre, aislantes térmicos, etc. La mayoría de estos son de fácil aplicación para el

presente trabajo se seleccionó un protector anticorrosivo y sobre todo que tenga alta resistencia mecánica. Tal como revisamos en el planteamiento las geomembranas sufren roturas sobre todo debido a cizallamiento. En este sentido se seleccionó el siguiente protector.

2.10.1. Sikalastic 841

Este tipo de recubrimiento tiene alta resistencia química es decir no reacciona con facilidad con otro elemento químico pero su principal bondad es la alta resistencia mecánica, además de esto es de fácil aplicación el curado es en pocos minutos y se encuentra listo para uso en un plazo de 24 horas. Su alta resistencia mecánica es debido a que es un compuesto a base de Poliurea, otro detalle importante es que este recubrimiento debe ser aplicado en caliente a una temperatura de 70 °C, en la Figura 13 podemos ver como se aplica este elemento.

Figura 13

Aplicación de Sikalastic 841



Nota: Aplicación de Poliurea en un almacén industrial. Tomado de (Sika, 2021).

2.10.1.1. Poliurea

Según tecnología de los plásticos (2012) Las Poliurea son una familia de polímeros sintéticos que se obtienen de la reacción de un diisocianato con una diamina, es una reacción de polimerización por condensación similar a la del poliuretano, la diferencia es que el enlace

que forma corresponde al de una urea, motivo por el cual se denomina como Poliurea. Una de las características más resaltantes de este material es la adaptabilidad a diferentes sustratos como podemos ver en la siguiente imagen.

Figura 14

Sustratos de la Poliurea



Nota: Diferentes tipos de materiales que se pueden cubrir con Poliurea. Tomado de tecnología de los Plásticos (2012).

Algunas de las características y ventajas más resaltantes son las siguientes:

- Rápida reactividad y tiempo de curado corto.
- Posibilidad de usar las instalaciones en corto tiempo.
- Mantiene sus propiedades entre -30 y 100°C.
- Muy buenas propiedades de puenteo de grietas.
- Gran resistencia a abrasión.

Entre los lugares donde comúnmente se aplican debido a las propiedades ya mencionadas tenemos los siguientes:

- Proteger estanques.
- Revestir protectores.
- Pisos de estacionamientos.
- Instalaciones de manufactura y fábricas.

- Lugares de almacenamiento de agua.
- Plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Revestimiento de carrocerías.

Entre las características técnicas más resaltantes tenemos las siguientes:

- Su base química es la Poliurea.
- El color es gris.
- El producto viene en dos partes en las que deben ser mezcladas.
- La densidad es de 1.12 kg/L.
- Su viscosidad es de 1200 MPa.
- Dureza 45.
- Resistencia mecánica 230 mg.
- Resistencia a la tensión 15 N/mm²
- Elongación a la rotura 360%.

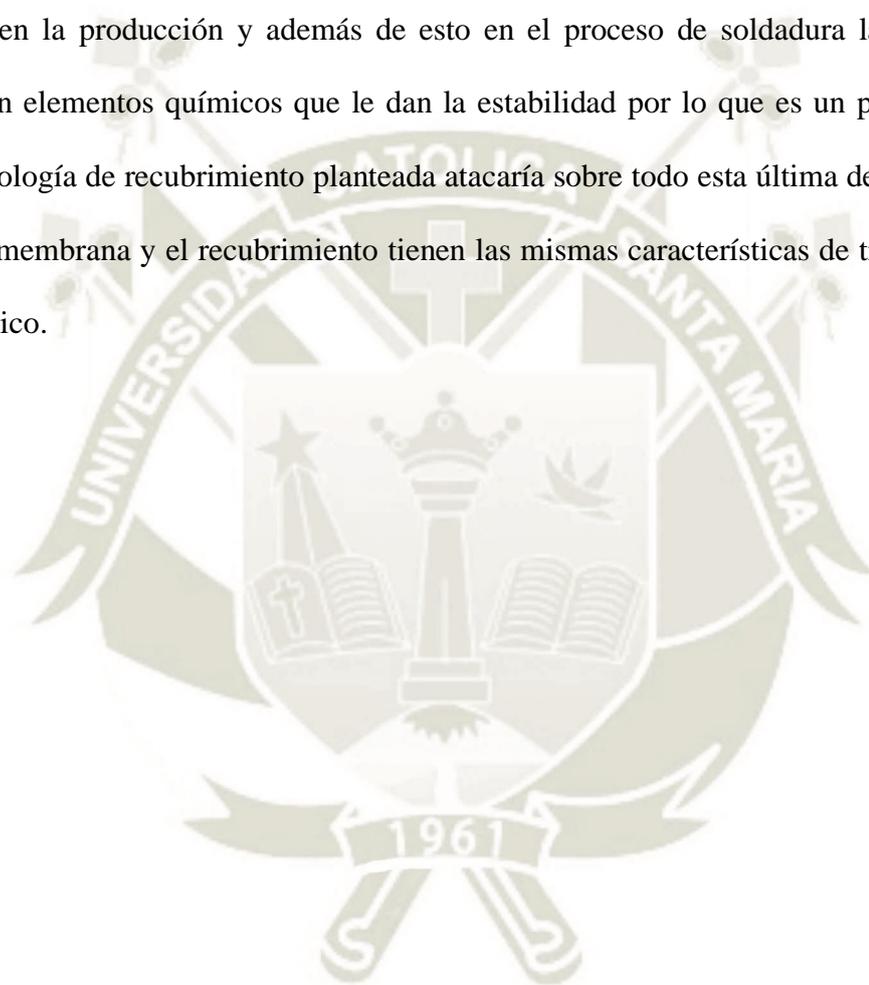
Aunque su aplicación es fácil debe ser realizada por especialistas y sigue las siguientes especificaciones:

- La proporción de mezcla es de 1-1.
- El elemento debe ser trabajado a 65 °C.
- El espesor que se logra por cada impregnación es de 2 mm.
- El rendimiento 1.05 kg por metro cuadrado.
- Es recomendable que la temperatura ambiente no esté fuera del rango de los -20 °C o 50 °C, con una humedad relativa máxima de 80%.
- La temperatura del sustrato no debes salir del rango de 1 °C a 50 °C.
- El tiempo de curado es de 24 horas.
- Para poder repintar se puede hacer te entre 1 a dos minutos.

Todas estas características son importantes y motivo por el cual se decidió por probar la hipótesis si realmente este material podía ser usado recubriendo geomembranas.

2.10.2. Factores que provocan la ruptura de las geomembranas

Según IGC (2019) los motivos para que un geosintéticos pueden ser muy variados entre los que destacan la aparición de fallas, irregularidades muy marcadas en el terreno fallas en la producción y además de esto en el proceso de soldadura las geomembranas pierden elementos químicos que le dan la estabilidad por lo que es un proceso crítico, la metodología de recubrimiento planteada atacaría sobre todo esta última debilidad dado que la geomembrana y el recubrimiento tienen las mismas características de tracción y soporte mecánico.



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada por que se intenta resolver o mejorar una condición real de la industria como es el rango de seguridad de las geomembranas, para prevenir roturas, del mismo modo también podemos decir que es una investigación del tipo experimental, dado que para probar la hipótesis de investigación seguiremos estrictamente una secuencia de experimentos con la respectiva prueba estadística.

3.1.1. Experimental

La presente investigación es del tipo experimental dado que se desarrollará en un laboratorio y/o en condiciones controladas, aplicando un tratamiento a una geomembrana, además se contará con grupo de control, es decir a otra geomembrana no se aplicara tratamiento; para luego desarrollar pruebas a ambas y así comparar si existe diferencia significativa en los resultados de las pruebas realizadas entre ambas muestras (Sampieri, 2014).

Es importante, además mencionar que se puede identificar claramente una variable independiente, que vienen a ser el tratamiento en sí, y una variable respuesta o dependiente, que vienen a ser la mejora de las propiedades de la geomembrana las que vemos en el siguiente cuadro.

3.2. Variables

Dada la naturaleza experimental de la presente investigación es que se cuenta con variable independiente que es la que manipulamos, en la presente investigación representada por el hecho de impermeabilizar o no la geomembrana y variable dependiente está representada por el impacto o no en las propiedades mecánicas de la geomembranas, lo que

se medirá con la resistencia antes del estiramiento irreversible (punto de fluencia) y la resistencia a la perforación, lo mencionado lo presentamos en la Tabla 5.

Tabla 5

Cuadro de variables

Variables	Dimensión	Nivel	Indicadores
V. Independiente Tratamiento con sustancia impermeabilizante	HDPE	No recubierta	No
		Recubierta Sikalastic 841	Si
		Recubierta Sikalastic 841 y prueba de temperatura	Si
	LLDPE	No recubierta	No
		Recubierta Sikalastic 841	Si
		Recubierta Sikalastic 841 y prueba de temperatura	Si
V. Dependiente Resistencia de la geomembrana	Tracción	Máxima tolerancia antes de estiramiento	Lb/in
	Perforación	Presión de rotura	Newton de fuerza
	Temperatura	Máxima tolerancia antes de estiramiento	Lb/in

Nota. Se desarrolla las pruebas mecánicas a los dos tipos de geomembrana tanto de alta como de baja densidad Elaboración propia.

3.3. Procedimiento experimental

En el presente describiremos con detalle cómo se llevara a cabo los experimentos desde la obtención de las geomembranas hasta los procedimientos de punzonado, tracción y tratamiento a temperatura.

3.3.1. Obtención de Geomembrana y materiales

Para la investigación experimental utilizaremos Geomenbranas de Alta y Baja densidad las cuales serán compradas de una empresa que comercialice geosintéticos de las que hay varias en nuestra ciudad. La sustancia impermeabilizante está compuesta por Sikalastic 841 u otra marca a base de Poliurea, de no ser posible se maneja también la posibilidad de acudir a empresas especializadas en la ciudad de Lima, en aplicar estos recubrimientos.

3.3.2. Proceso de Impermeabilización de Geomembranas

Para la impermeabilización necesitamos 2 m² de geomembrana de alta y baja densidad la cual mediremos con la Huincha y luego procederemos a cortar con el Cúter. Una vez tengamos las geomembranas cortadas según las medidas especificadas para cada prueba, procederemos a impermeabilizarla, con el Sikalastic 841 se impregnará en las geomembranas estando el producto precalentado a 60 °C como lo indica el manual para recubrimiento del producto.

3.3.2.1. Proceso para determinar la resistencia a la temperatura

Para este experimento nos basamos en las investigaciones hechas por Luiz Lavoie, Kobelnik, & Apareci (2020) de la universidad de Sao Paulo Brasil, en las que para comprobar la influencia de la temperatura en el comportamiento de la geomembrana sumergieron muestras de geomembrana a 50°C para luego de 30 días realizar pruebas de tracción, en la mencionada prueba se vio que efectivamente un aumento en el alargamiento por tracción. En la presente investigación se desarrolla los mismos experimentos, con las muestras de geomembranas ya mencionadas usando para esto 10 muestras cubiertas y no cubiertas, para realizar las comparaciones respectivas con las muestras que no fueron sometidas a tracción.

3.3.2.2. Experimentación prueba de temperatura

Para la mencionada prueba se sumerge las 20 muestras, 10 cubiertas y 10 no cubiertas en un recipiente a temperatura constante de 50°C por 30 días, al cabo del mencionado experimento se realiza pruebas de tracción para compararlo con las muestras homologas, pero sin tratamiento. Todo esto con el fin principal de ver si la temperatura tiene una afectación directa en las propiedades mecánicas del recubrimiento impregnado, debido a que es conocido que la temperatura es una variable para considerar en las operaciones de

lixiviación, esto por lo extendido del sistema de tuberías, que bajo altas temperaturas pueden funcionar como eficientes calentadores de la solución lixiviante.

Para este experimento será necesario:

- Un termómetro digital para el control de temperatura
- Un cocina a gas para mantener la temperatura indicada
- Una bandeja
- 10g de ácido por litro de agua (concentración para lixiviar cobre)

El experimento se desarrollará en un lugar ventilado y con el número de muestras ya mencionadas.

Figura 15

Termómetro digital



Nota. En la Figura 15 vemos un termómetro digital, el cual será usado para el desarrollo de las pruebas.

Los resultados de la presente experiencia se tomarán en tablas para que luego se puedan tratar con programas estadísticos, con el fin de detectar si existe estadísticamente diferencia considerable entre las medias de los grupos evaluados.

Tabla 6

Tabla de toma de datos

Numero de prueba	HDPE	HDPE Cubierto	LLDPE	LLDPE Cubierto
1				
2				
3				
.				
.				
.				
10				

Nota. En este modelo de tabla se tomara datos de las diferentes pruebas a realizarse. Elaboración propia.

3.3.3. Proceso para determinar la resistencia a la tracción

Para determinar la resistencia a la tracción en la geomembrana se seguirá el procedimiento en la norma ASTM D 6392 que consiste en tomar una muestra de la geomembrana de alta y baja densidad impermeabilizadas y procederemos al estiramiento de las mismas, con el aparato tensiómetro mediremos el comportamiento del material mientras dura el estiramiento, principalmente ira midiendo la fuerza. Al seguir incrementando la fuerza sobre esta llegara un punto en el que la fuerza para estirla bajará considerablemente, hasta llegar a un punto donde la fuerza empiece a recuperarse en este punto se dará por finalizado la prueba dado que lo que se quiere es el límite elástico y no la rotura.

Figura 16

Medidas de muestra de geomembrana para tracción



Nota. Medidas basadas en la norma ASTM 6392 para pruebas de tracción. Elaboración propia.

En la Figura 19 podemos ver el tamaño de la muestra que se utilizará para la prueba de tracción. Para el mencionado experimento se tomarán 10 muestras de geomembranas cubiertas, no cubiertas y de los tipos de material usado tanto la geomembrana de alta como la de baja densidad, dándonos un total de 40 muestras. Para el desarrollo de las pruebas se usará el equipo Demtech Pro-Tester.

3.3.3.1. Curvas tensión deformación

En la Figura 16 podemos ver referencialmente la curva que registra la geomembranas tras la aplicación de fuerza en un diagrama deformación vs tensión, datos que se pueden calcular a partir de mediciones registradas por el equipo tensiómetro.

Figura 17

Partes de la curva de tracción en geomembranas.



Nota. En la figura podemos ver la curva que describe una geomembrana al ser sometida a tensión. Tomado de Universidad Politécnica de Valencia (2020).

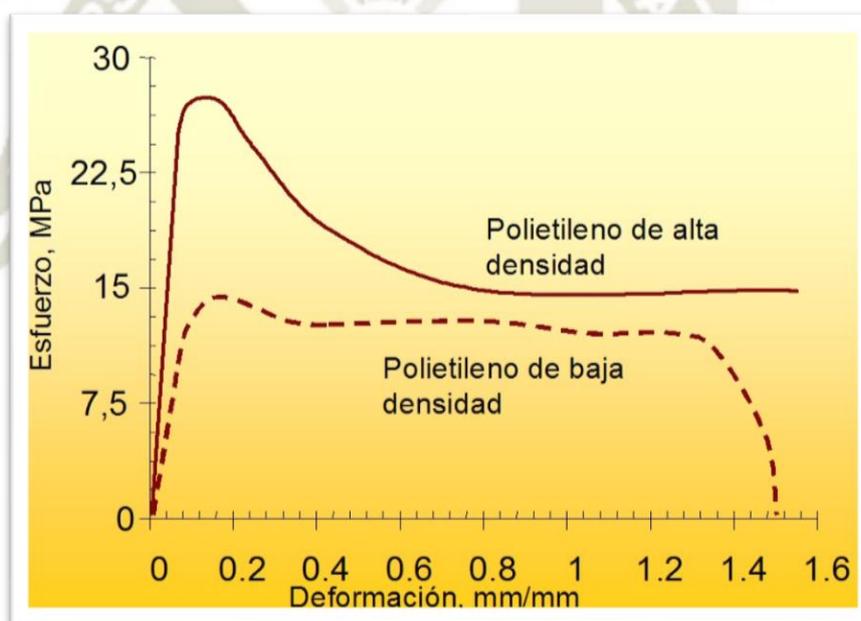
Como podemos apreciar de la anterior imagen la curva presenta diferentes partes, siendo la primera una etapa deformación elástica la que se caracteriza porque el material al quitarle la fuerza regresa a su longitud original, esta etapa tiene su máximo valor en el punto

denominado límite elástico punto en el que se nota una clara baja en la resistencia del material, posterior a esto la resistencia vuelve a incrementarse a esta etapa se le denomina deformación plástica y se caracteriza porque el material tras retirarle la fuerza no regresa hacia su longitud original, en la presente investigación el punto de comparación será el límite elástico.

En la Figura 17, podemos ver la diferencia entre el polietileno de alta densidad y de baja densidad resaltándose que el polietileno de alta densidad tiene un límite elástico más alto y marcado a diferencia del polietileno de baja densidad.

Figura 18

Diferencia de la curva entre polietileno de alta y baja densidad.

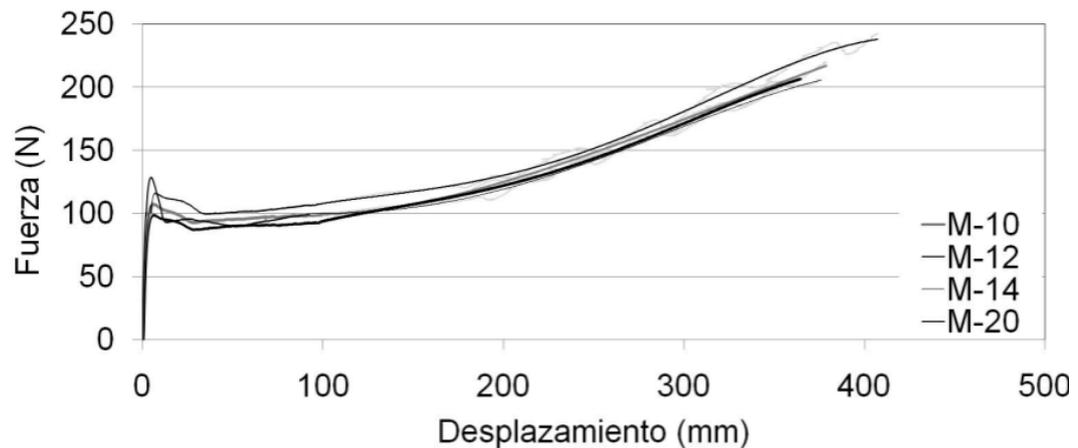


Nota. En la grafica vemos las curvas esfuerzo – deformación, donde se denota la diferencia que existe entre los dos tipos de geomembrana HDPE y LLDPE. Tomado de Universidad Politécnica de Valencia (2020).

Finalmente citaremos un diagrama fuerza deformación que es el diagrama que se desarrollará en la presente investigación dado que los anteriores diagramas están expresados en función a tensión, en el siguiente diagrama los valores se expresarán en función a fuerza y deformación qué son las unidades en las que se presentará los diagramas en la presente.

Figura 19

Diagramas fuerza desplazamiento.



Nota. En la figura podemos ver la curva Desplazamiento fuerza para geomembrana sometida a pruebas de tracción de diferentes espesores. Adaptado de Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, (2012).

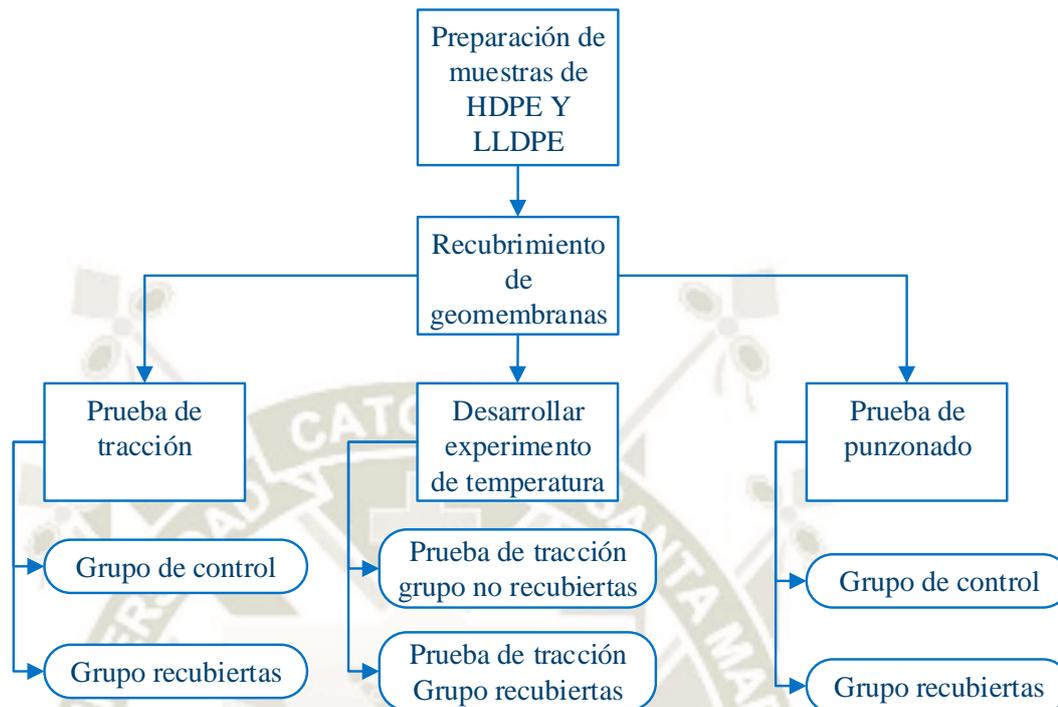
En la Figura 18 podemos ver curvas de desplazamiento fuerza para geomembranas de 10, 12, 14 y 20 mm, reafirmando la forma de la curva presentada anteriormente destacándose un punto del límite elástico máximo seguido de una larga etapa de deformación plástica.

3.3.4. Proceso para determinar la resistencia a la perforación

Para el procedimiento de resistencia a la perforación como ya se indicó, nos basaremos en la norma ASTM D6241 la que nos indica que debemos tomar muestras de 25 cm x 25 cm, para poder colocarlo en la prensa la que tendrá un manómetro que nos pueda dar la medida de la presión, para que así se pueda registrar la presión de rotura de la geomembrana en una tabla similar a la Tabla 6, para posteriormente realizar el análisis de los datos, mediante el análisis de la varianza de los grupos de datos, es decir si existe diferencia significativas entre las medias de los grupos de datos.

Figura 20

Secuencia de experimentación



Nota. La secuencia de experimentación esta referida a el orden en el que se llevarán a cabo las diferentes pruebas que se realizaran a los dos tipos de geomembranas.

En la figura 20 presentamos un resumen de los experimentos a realizar los que ya describimos con detalle en los párrafos anteriores, es importante que en todos los casos se usen geomembranas recubiertas y no recubiertas, a estas últimas en algunas ocasiones se les denomina grupo de control debido a que no sufren ningún tratamiento.

3.3.5. Procesamiento estadístico de análisis de datos

Para el análisis de la información recolectada, según los experimentos realizados se desarrollarán diferentes pruebas de hipótesis. Es importante recordar que para los análisis estadísticos usaremos T-Student cuando sea necesario comparar 2 grupos de medidas y usaremos ANOVA cuando se tenga que comparar 3 grupos de medidas dentro del ANOVA usaremos Bonferroni cuando necesitemos saber entre que grupos de medidas hay diferencias.

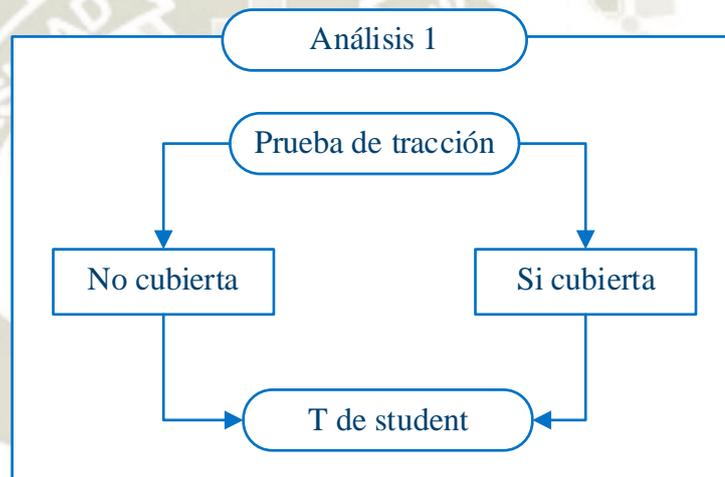
3.3.5.1. Pruebas T-Student

Se realizarán tres pruebas T-Student

- a) Análisis 1: Se compara los promedios de las medidas de las muestras sometidas a tracción que no pasaron por la prueba térmica, comparando las muestras que fueron cubierta vs las que no fueron cubiertas, con el fin de ver si el recubrimiento refuerza las propiedades mecánicas de la geomembrana.

Figura 21

Análisis 1

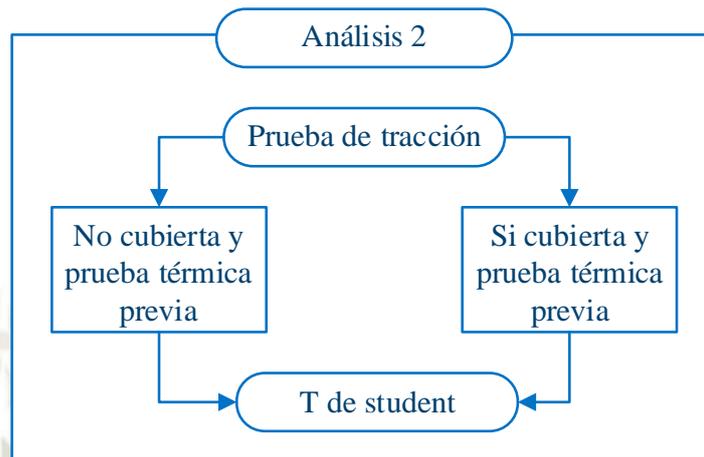


Nota. Las muestras sometidas a prueba son 10 por cada prueba, por lo que se compara diferencia estadística entre estos grupo de datos.

- b) Análisis 2: En el segundo análisis que también se trata de analizar dos grupos de medidas, en este caso los grupos de geomembranas sometidas a tracción que sufrieron la prueba térmica, evaluando las cubiertas vs las no cubiertas, del mismo modo que el anterior para ver si hay mejora en las propiedades mecánicas.

Figura 22

Análisis 2

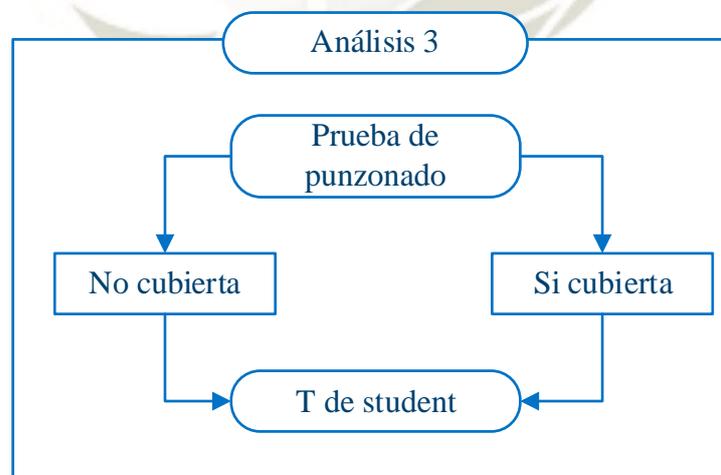


Nota. La prueba térmica esta referido a que en este caso las muestras pasaran por un prueba, que implica someter a la muestra a varios días de sumergirse en agua acidulada.

- c) **Análisis 3:** Para el tercer análisis se compara las medidas de la prueba de punzonado comparando las medidas del grupo de las muestra cubiertas vs las muestras no cubiertas con el fin de conocer si el recubrimiento de las muestras tiene o no impacto, en específico en este tipo de prueba.

Figura 23

Análisis 3



Nota. La prueba de puzonado se desarrolla solo a muestras cubiertas y no cubiertas con la poliurea.

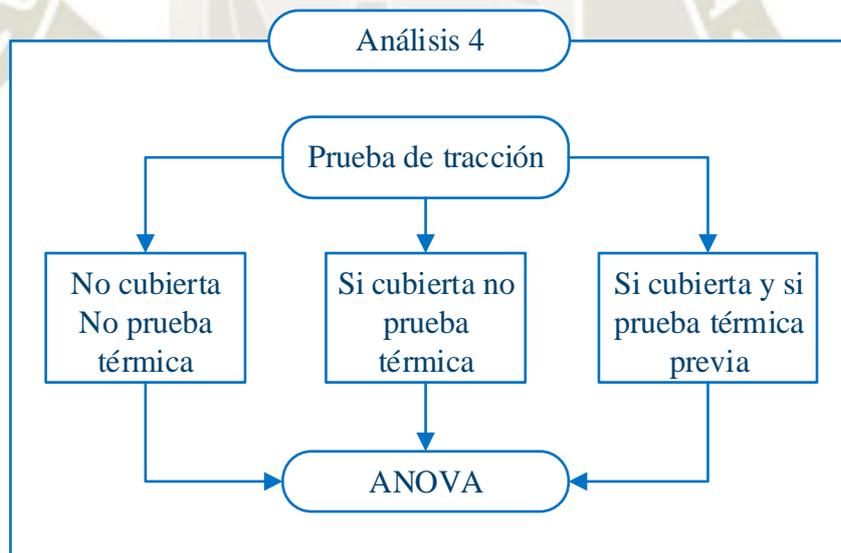
3.3.5.2. Prueba ANOVA

Se desarrollará una prueba ANOVA para comparar tres grupos de medidas

d) Análisis 4: Para realizar este análisis se tomará los datos de tres pruebas de tracción la primera las dos cubiertas, tanto la que paso prueba de temperatura como la que no y un grupo de control es decir que no fue recubierta ni paso tratamiento térmico, con el fin de ver en este grupo de tres cual nos ofrece mejores propiedades, debería de ser las dos geomembranas recubiertas. Y a la vez ver si hay diferencia estadística entre el grupo de medidas del grupo de geomembranas que pasaron y no pasaron por la prueba de calor, con el fin de ver si hay alguna afectación a las propiedades mecánicas al someterlo a esta prueba.

Figura 24

Análisis 4



Nota. Se desarrolla esta triple comparación con la intención de ver la resistencia a la tracción de los tres casos mencionados.

Para el análisis estadístico de los datos se desarrollará una tabla de análisis de varianza en el que se comparara los resultados de los diferentes materiales con y sin tratamiento para ver si hay diferencia entre ellos, de ser así, es decir si existe clara diferencia

de sus varianzas, entonces se aplicara el procedimiento Tukey para reconocer cual de todos los tratamiento y materiales es el que ofrece una mejor respuesta.

Figura 25

Análisis ANOVA

<i>ANOVA</i>				
<i>Fuente</i>	<i>Sumas de Cuadrados</i>	<i>g.l.</i>	<i>Estimadores</i>	<i>F_{exp.}</i>
<i>Entre</i>	$Q_{Entre} = \sum_{i=1}^r n_i (x_{i\cdot} - \bar{x})^2$	<i>r-1</i>	$S_{Entre}^2 = Q_{Entre} / r - 1$	$F_{exp} = \frac{S_{Entre}^2}{S_{Dentro}^2}$
<i>Residual</i>	$Q_{Dentro} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - x_{i\cdot})^2$	<i>N-r</i>	$S_{Dentro}^2 = Q_{Dentro} / N - r$	
<i>Total</i>	$Q_{Total} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2$	<i>N-1</i>		

Nota. La tabla muestra las fórmulas para el cálculo manual de análisis de la varianza de los resultados.

Donde:

$X_{i\cdot}$: Suma de las observaciones del tratamiento

\bar{x} : Media de las observaciones del *i*-esimo tratamiento

x_{ij} : Suma de las N mediciones

La citada tabla muestra la forma analítica o el detalle de las fórmulas para hallar cada cuadrante, en el presente estudio para mayor exactitud se desarrollará con la ayuda del software SPSS Statistics y Excel.

CAPÍTULO IV

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo presentamos los experimentos según la secuencia que fueron realizados, los resultados, descripción y algunos apuntes según se desarrolló cada experimento, como segunda parte se presenta los análisis de los datos que se desarrollaron por cada punto según el detalle ya expuesto en el capítulo anterior.

4.1. Pruebas a Geomembranas de HDPE

4.1.1. Prueba de temperatura

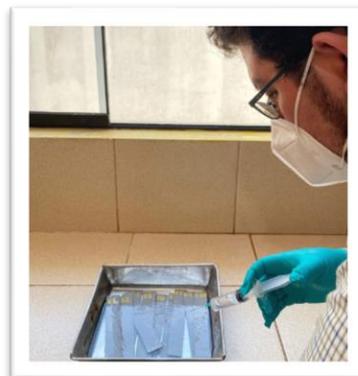
La prueba de temperatura se desarrolla con el fin de evaluar la geomembrana a condiciones de temperatura alta, debido a las condiciones ambientales y al diseño de los PADs que hacen que los PADs trabajen en temperaturas de hasta 45°C, en el presente caso se trabajará bajo condiciones de 50 °C, para lo que:

Primero: Se preparó las geomembranas según las medidas especificadas tanto las cubiertas como las no cubiertas con el elemento impermeabilizante.

Segundo: Se preparó la solución para sumergir las muestras de geomembrana que como se indicó se trata de una agua acidulada con ácido sulfúrico con una concentración de 10 gr por litro.

Figura 26

Muestras de geomembrana en solución, recubiertas



El mismo procedimiento se realizó para las muestras de geomembrana no recubiertas, en ambos casos se usó como combustible el gas para mantener la temperatura, por motivos de evaporación se tuvo que monitorear la cantidad de solución, renovándola cada vez que fue necesario.

Figura 27

Geomembranas sumergidas, no cubiertas



Nota. En la imagen vemos muestras de geomembranas sumergidas en el agua acidulada.

Según lo descrito se mantuvo esto por 30 días, monitoreando temperatura de 50°C como vemos en la Figura 27, nivel de solución, al cavo del mencionado tiempo se procedió a realizar las pruebas de tracción conforme se describió, finalizado el periodo de prueba no se registraron mayores cambios aparentes en el color textura o forma de la geomembrana o el recubrimiento, por lo que quedo listo para la prueba de tracción.

4.1.2. Pruebas de resistencia a la tracción.

Para realizar las pruebas de tracción primero se preparó el equipo, las pruebas se realizaron junto a un especialista en el manejo de este tipo de equipos primero se realizaron a las geomembranas sometidas a la prueba de temperatura.

Es importante mencionar que antes de realizar la prueba el equipo fue calibrado de modo que se verifique que las lecturas que se tomen sean las más exactas, el procedimiento de calibración estuvo a cargo del especialista en el manejo del equipo.

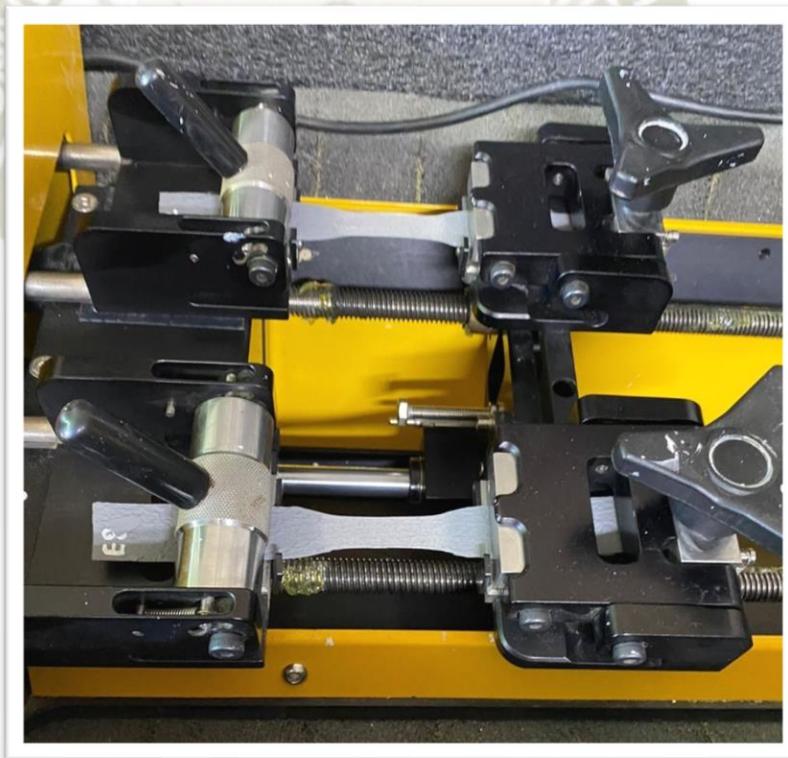
4.1.2.1. Pruebas de tracción a muestras sometidas a pruebas de temperatura

a) Geomembrana cubierta

Como ya se describió un grupo de muestras pasaron por un procedimiento de someterlas a solución a una medida de temperatura, por un periodo de 30 días, obteniéndose los siguientes resultados.

Figura 28

Prueba de tracción Si cubierto Si prueba de temperatura.



Nota. Muestras de geomembrana HDPE sometidas a prueba de tracción que si fueron recubiertas con el aditivo además que pasaron previamente por la prueba de temperatura.

En la Figura 28 podemos observar como el recubrimiento no se daña pese al alto esfuerzo mecánico que exige la prueba de tracción, no registrándose desgarros y aguantando

igual que la geomembrana, además como podemos observar el equipo es capaz de realizar dos pruebas a la vez, los resultados de las 10 pruebas realizadas fueron registradas en la

Tabla 7.

Tabla 7

Prueba de tracción, Si recubierto Si prueba de temperatura.

Prueba	Con recubrimiento lb/in	Estiramiento %
1	186	116
2	173	110
3	173	112
4	169	111
5	174	115
6	171	109
7	185	119
8	176	106
9	176	106
10	171	118

Nota. Datos tomados tras prueba de tracción realizada a muestras especificadas en equipo Demtech Pro-tester a velocidad de 2 pulgadas por minuto.

En la tabla 7 podemos ver el estiramiento sufrido por la geomembrana al momento de tomar las lecturas, además en la tercera columna indicando las mediciones en porcentaje.

b) Geomembrana no cubierta

Los resultados que se obtuvieron al realizar la prueba los presentamos en la siguiente tabla en la que también se presenta el estiramiento para la medición registrada, el cual se expresa en porcentaje.

Tabla 8

Prueba de tracción, No recubierto Si prueba de temperatura.

Prueba	Sin revestimiento lb/in	Estiramiento %
1	158	103
2	168	113
3	164	107
4	171	109
5	157	112
6	163	107
7	162	108
8	163	104
9	168	112
10	165	106

Nota. La prueba se desarrolló a una velocidad de 2 pulgadas por minuto.

Estos resultados serán contrastados con la anterior tabla para poder determinar si el recubrimiento tiene algún tipo de influencia en la mejora de las características mecánicas de la geomembrana.

En la Figura 29 podemos ver una foto de una de las pruebas realizadas, mostrándose claramente como la geomembrana se fue estirando hasta alcanzar el límite elástico máximo, momento en el cual se tomó las lectura de libras fuerza por pulgada y el estiramiento en porcentaje para este punto.

Figura 29

Geomembranas no cubiertas sin tratamiento.



Nota. Muestras de geomembrana de HDPE no cubiertas por el aditivo, sometidas a prueba de tracción. desarrollado en equipo de tracción Demtech Pro-Tester Elaboración propia.

4.1.2.2. Pruebas de tracción a muestras No sometidas a prueba de temperatura

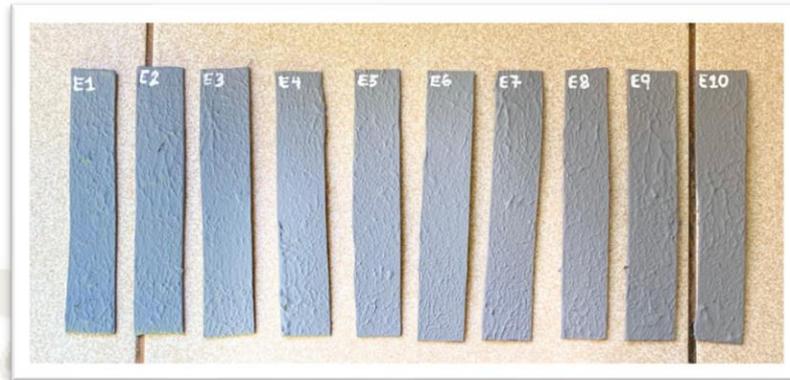
Como en el anterior caso tenemos las muestras que si fueron recubiertas y las que no fueron recubiertas con el elemento protector Sikalastic 841.

a) Geomembrana cubierta

Como podemos ver en la Figura 30, vemos las 10 muestras quedan listas para la prueba tras ser sometidas al procedimiento de recubrimiento.

Figura 30

Muestras recubiertas no sometida a calor



Nota. Muestras de geomembrana de HDPE que si fueron cubiertas por el aditivo, listas para pasar pruebas de tracción y temperatura.

En la Tabla 9 presentamos los resultados para cada prueba de tracción a las muestras no sometidas a la prueba de temperatura, pero que si fueron recubiertas con el aditivo.

Tabla 9.

No prueba de temperatura, Si recubrimiento

Prueba	Con revestimiento lb/in	Estiramiento %
1	175	102
2	186	117
3	183	106
4	177	113
5	189	116
6	182	112
7	175	115
8	177	117
9	173	116
10	173	109

Nota. Prueba realizada con equipo de tracción Demtech Pro-Tester a velocidad de 2 pulgadas por minuto, registrándose la máxima tensión alcanzada.

b) Geomembrana no cubierta

Los resultados obtenidos para las geomembranas no cubiertas fueron las siguientes:

Tabla 10

No prueba de temperatura, No recubrimiento.

Prueba	Sin revestimiento lb/in	Estiramiento %
1	168	102
2	163	114
3	162	108
4	167	107
5	164	114
6	157	112
7	162	109
8	168	105
9	156	109
10	171	107

Nota. Pruebas realizadas con equipo de tracción Demtech Pro-Tester, a velocidad de 2 pulgadas por minuto.

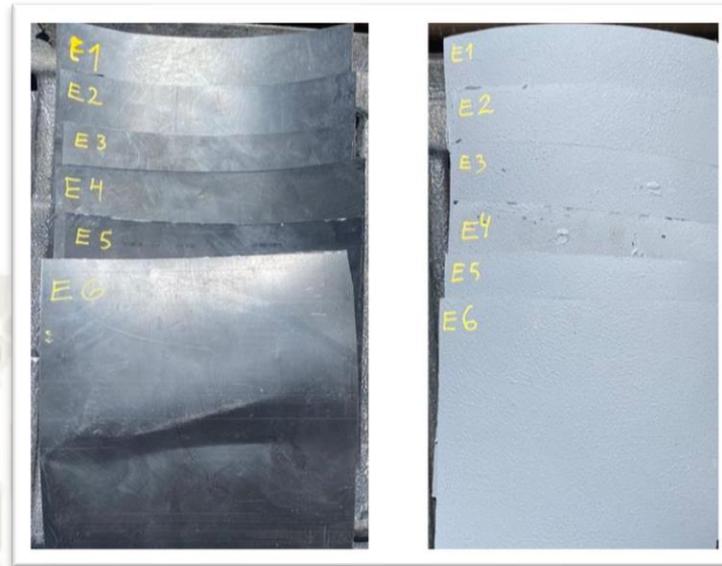
4.1.3. Prueba de resistencia a la perforación

Para el desarrollo de la prueba de perforación se mandó a fabricar el elemento necesario para realizar la prueba basado en la norma ASTM D6241. Las medidas del elemento de perforación la correspondiente brida que sostendrán a la geomembrana las especificamos en el Anexo A. Preparado los elementos se desarrolló la prueba en una prensa de 50 Tn de capacidad, del mismo modo que en las anteriores pruebas se prepararon las geomembranas cubiertas y no cubiertas para establecer si existen diferencias en esta propiedad mecánica.

En la Figura 31 podemos ver las muestras listas para desarrollar la mencionadas pruebas tanto las cubiertas como las no recubiertas con el elemento que se está usando para impermeabilizarlas.

Figura 31

Muestras listas para prueba de perforación.



Nota. Muestras de geomembranas de 2mm listas para el desarrollo de la prueba de perforación.

4.1.3.1. Prueba de resistencia a la perforación geomembranas cubiertas y no cubiertas

Se prepararon las muestras según el procedimiento ya citado lo que podemos ver en la anterior imagen y en la tabla siguiente podemos ver los resultados obtenidos para este grupo de muestras.

Tabla 11

Resultados prueba de perforación

Muestra	Presión de rotura (N)	
	Sin recubrimiento	Con recubrimiento
1	510	515
2	525	525
3	500	530
4	508	525
5	495	515
6	506	535
7	510	510
8	511	528
9	529	510
10	495	535

Nota. Podemos ver en la tabla los resultados para las 10 muestras analizadas.

En la Tabla 11 podemos ver los resultados obtenidos para las muestras que no fueron recubiertas con el elemento protector, en la columna 2 podemos ver los resultados para el ensayo de perforación para las muestras que si fueron sometidas a recubrimiento, los resultados al momento en que la geomembrana se rompió, como podemos ver en la Figura 32 donde se presenta la prueba de perforación tanto para las muestras cubiertas como no cubiertas con los elementos de perforación previamente fabricados según norma.

Figura 32

Prueba de resistencia a la perforación



Nota. Elaboración propia, pruebas de perforación realizadas a geomembranas de 2mm tanto cubiertas como no cubiertas, con los elementos diseñados especialmente para esta prueba.

4.2. Pruebas a Geomembranas de LLDPE

Para desarrollar las pruebas de tracción del mismo modo que en las pruebas de HDPE se sometió a las geomembranas de LLDPE a 30 días de sumergirlas en agua acidulada con un contenido de 10gr de ácido sulfúrico por litro de agua a 50 °C de temperatura en muestras cubiertas y no cubiertas en tiras de 6 X 1 pulgada de geomembrana de 2mm, importante recordar que la diferencia fundamental de este tipo de geomembrana es su mayor grado de elasticidad y flexibilidad. Desarrollado este procedimiento junto a las anteriores muestras se sometió a realizar las pruebas de tracción.

4.2.1. Pruebas de resistencia a la tracción

Luego de realizado las pruebas de tracción los resultados encontrados los presentamos en la siguientes tablas.

4.2.1.1. Muestras que No pasaron por prueba de temperatura

Primero presentamos en la Tabla 12 las muestras que no fueron sometidas a la prueba de temperatura de 30 días, los datos obtenidos son los siguientes.

Tabla 12

Pruebas de tracción Geomembranas LLDPE, No prueba de temperatura

Prueba	Sin revestimiento lb/in	Estiramiento %	Con revestimiento lb/in	Estiramiento %
1	168	119	175	115
2	163	128	186	110
3	162	118	183	124
4	167	120	177	127
5	164	114	189	120
6	157	125	182	118
7	162	115	175	115
8	168	124	177	117
9	156	119	173	123
10	171	126	173	118

Nota. En la tabla podemos ver los resultados para la prueba de tracción, tanto para las muestras con revestimiento como para las muestras sin revestimiento para geomembranas de LLDPE.

Como podemos ver en la tabla 12, presentamos un consolidado de los datos registrados para las pruebas con geomembrana LLDPE, para las muestras que no pasaron por la prueba de temperatura, los datos serán analizados más adelante para ver si hay influencia o no sobre la aplicación del recubrimiento.

4.2.1.2. Muestras que Si pasaron por prueba de temperatura

Los resultados para prueba de tracción para las muestras que si pasaron por la prueba de temperatura los presentamos en la Tabla 13 incluyendo tanto las geomembranas que si fueron recubiertas como las que no fueron recubiertas además de los alargamientos registrados en el punto de fluencia que es en el punto en el que se toman los datos.

Tabla 13

Prueba de tracción LLDPE si prueba de temperatura.

Prueba	Sin revestimiento lb/in	Estiramiento %	Con recubrimiento lb/in	Estiramiento %
1	158	127	186	123
2	168	122	173	126
3	164	124	173	128
4	171	128	169	119
5	157	115	174	110
6	163	117	171	117
7	162	127	185	115
8	163	125	176	117
9	168	110	176	126
10	165	118	171	128

Nota. En la tabla podemos ver los resultados para la prueba de tracción, tanto para las muestras con revestimiento como para las muestras sin revestimiento para geomembranas de LLDPE y que además si pasaron previamente por prueba de temperatura. Elaboración propia en equipo de tracción Demtech Pro-Tester.

En la Tabla 13 se registran los datos para la prueba de tracción tanto para las muestras recubiertas como para las no recubiertas, además de los registros de % de estiramiento respectivos.

4.2.2. Prueba de perforación LLDPE

La mencionada prueba se desarrolló bajo la norma ASTM D624 en similares condiciones a las muestras de HDPE, de la cual ya se hizo referencia en el Anexo A en cuanto al instrumento de perforación, en la siguiente tabla presentamos los resultados obtenidos para las geomembranas LLDPE de 25 x 25 cm tanto cubiertas como no cubiertas, además también presentamos en la Figura 33 un detalle de lo que fue la prueba en el punto de ruptura para las geomembranas.

Figura 33

Detalle de prueba de perforado



Nota. Las muestras presentaron un estiramiento uniforme hasta un momento puntual en que la muestra rompe.

Finalmente, en la Tabla 14 presentamos los datos para la prueba de perforación tanto para geomembranas recubiertas como para las no recubiertas, posteriormente se realiza un análisis de la varianza de estos resultados para ver las diferencias entre ambos grupos de muestras.

Tabla 14*Prueba de perforación LLDPE*

Muestra	Fuerza de rotura (N)	
	Sin revestimiento	Con revestimiento
1	401	415
2	393	419
3	395	425
4	410	418
5	408	425
6	405	427
7	413	425
8	410	419
9	389	423
10	410	427

Nota. En la tabla se presentan los resultados para la prueba de perforación de la geomembrana de LLDPE, tanto para geomembranas recubiertas como no recubiertas.

Las mediciones registradas se convirtieron a Newton y serán analizadas con detalle en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

5. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo analizaremos según lo diseñado en el capítulo diseño metodológico la comparaciones de los grupos de medidas con el fin de determinar la influencia en las propiedades mecánicas, de aplicar un recubrimiento a las geomembranas tanto de LLDPE como HDPE, además determinar si las propiedades mecánicas son afectadas al sumergir por 30 días a una temperatura de 50 °C, a solución de lixiviación, 10gr de ácido sulfúrico por litro de agua. Para el análisis de los datos nos apoyamos en el software SPSS Statistics y Excel.

5.1. Geomembranas de HDPE

5.1.1. Análisis 1, tracción geomembranas No prueba de temperatura

En la presente se compara las mediciones de las pruebas de tracción de las muestras No sometidas a la prueba de temperatura a continuación presentamos los datos de tracción y respectiva gráfica, se presentan los datos en la Tabla 15.

Tabla 15

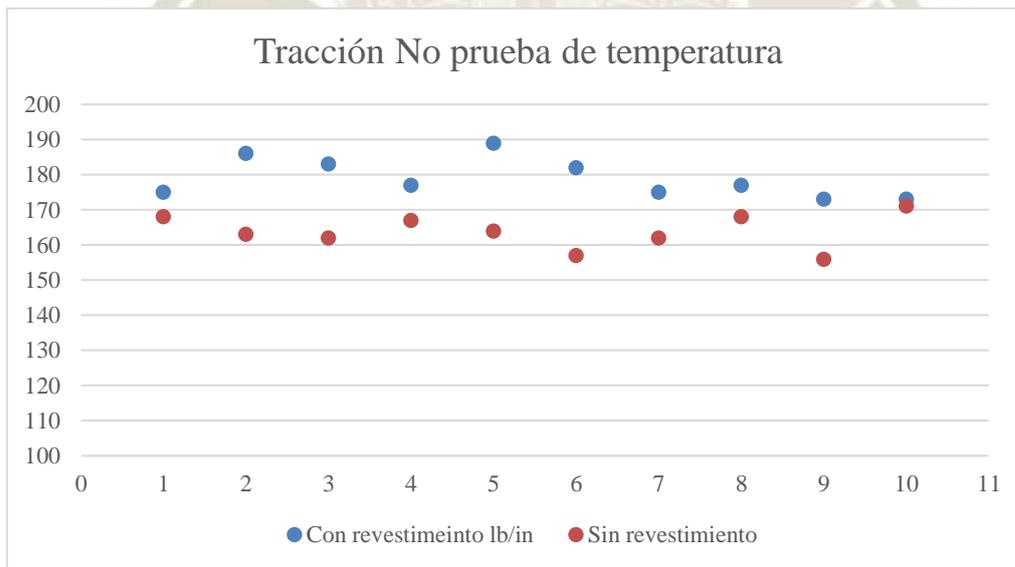
Datos cubiertas vs no cubiertas No prueba de temperatura.

Prueba	Sin revestimiento	Con revestimiento
	lb/in	lb/in
1	168	175
2	163	186
3	162	183
4	167	177
5	164	189
6	157	182
7	162	175
8	168	177
9	156	173
10	171	173

Nota. Se presentan ambos grupos de datos para ser analizados.

Figura 34

Comparación de datos de tracción



Nota. Lecturas tomadas con equipo Demtech Pro-Tester

Los datos presentados tras un primer análisis podemos ver en la Figura 35 que el segundo grupo en promedio es mayor es decir que las geomembranas cubiertas si tienen un

mejor desempeño, pero para mayor certeza, esto debe ser corroborado con la prueba estadística de comparación de grupos de medidas T-Student.

Tabla 16

Datos estadísticos HDPE No tratamiento térmico

Estadísticas de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
No prueba de temperatura	No cubiertas	10	163,800	4,8488	1,5333
	Si cubiertas	10	179,000	5,6372	1,7826

Nota. Estadísticos descriptivos calculados con el software SPSS Statistics.

En la Tabla 17 presentamos los datos para el análisis de las varianzas de los grupos de datos presentados mediante las pruebas T-Student.

Tabla 17

Prueba T-Student para geomembrana cubierta vs no cubierta o prueba de temperatura

Prueba de muestras independientes									
	Prueba de Levene de calidad de varianzas		Prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	,733	,403	-6,464	18	,000	-15,2000	2,3514	-20,1400	-10,2600
No se asumen varianzas iguales			-6,464	17,606	,000	-15,2000	2,3514	-20,1479	-10,2521

Nota. Se trabajo con la fila superior de datos al cumplir con los parámetros de varianzas iguales, la segunda fila queda descartada, calculados con el software SPSS Statistics.

De la Tabla 17 podemos interpretar que las varianzas de los grupos de datos analizados si son iguales, por lo que los podemos comparar, esto tras la prueba de Levene que se realizó con el paquete estadístico, en la prueba se obtiene el valor 0,403 que es mayor a 0.05 por lo que se asume varianzas iguales. Tras este dato se trabaja con la línea superior, en la cual destaca el dato de significancia de 0.00 que es menor a 0.05 que nos indica que si hay una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos de datos evaluados.

5.1.2. Análisis 2, tracción geomembranas Si prueba de temperatura

El segundo análisis se realiza al grupo de datos de prueba de tracción que pasaron por la prueba de temperatura previa los datos los presentamos en la siguiente gráfica.

Tabla 18

Datos cubiertas vs no cubiertas Si prueba de temperatura

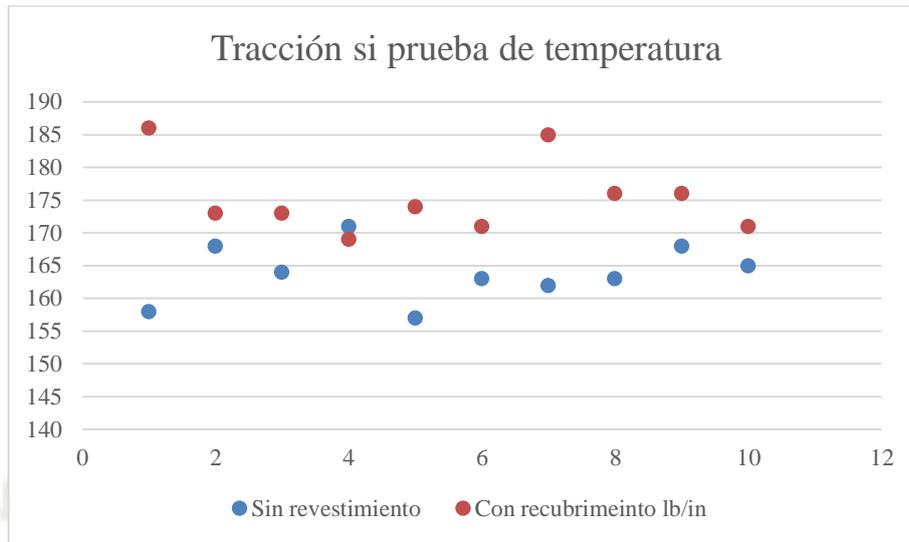
Prueba	Sin revestimiento	Con recubrimiento
	lb/in	lb/in
1	158	186
2	168	173
3	164	173
4	171	169
5	157	174
6	163	171
7	162	185
8	163	176
9	168	176
10	165	171

Nota. Comparación de grupos de datos de muestras cubiertas como no cubiertas.

En la siguiente figura presentamos los datos expuestos y en la tabla siguiente los principales estadísticos.

Figura 35

Comparación de datos si prueba de temperatura.



Nota. En la gráfica podemos ver los resultados para prueba de tracción para elementos recubiertos y no recubiertos, las mencionadas pruebas pasaron previamente por prueba de temperatura.

Tabla 19

Estadísticos descriptivos para muestras que pasaron temperatura.

Estadísticas de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Si prueba de temperatura	No cubierta	10	163,900	4,3830	1,3860
	Si cubierta	10	175,400	5,7581	1,8209

Nota. Estadísticos descriptivos, calculados con el software SPSS Statistics.

En la siguiente línea presentamos la tabla de comparación de medias mediante el análisis T-Student.

Tabla 20

Prueba T para muestras que pasaron temperatura.

	Prueba de Levene de calidad de varianzas		Prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	,482	,496	-5,025	18	,000	-11,5000	2,2884	-16,3077	-6,6923

Nota. Estadísticos descriptivos, calculados con el software SPSS Statistics.

Se concluye que entre los dos grupos de datos analizados si son comparables dado que tienen variables el valor 0.496 nos indica que tienen varianzas iguales, el valor de significancia bilateral es de 0.000 al ser menor a 0.05 nos indica que los grupos de medidas son estadísticamente diferentes, por lo que se concluye que efectivamente entre las geomembranas cubiertas y no cubiertas se encuentra diferencias en cuanto a sus valores de tracción con un promedio de 163 lb/pulg para geomembranas no cubiertas y 175 lb/pulg para las geomembranas cubiertas.

5.1.3. Análisis 3, análisis de la varianza

Finalmente se realizará el análisis de la varianza comparando tres grupos datos, al tratarse tres grupos de datos ya no se trata T-Student si no ANOVA, los grupos analizados serán los siguientes.

- 1.- Grupo de control, No tratamiento de temperatura No cubierto
- 2.- No tratamiento térmico, Si cubierto

3.-Si tratamiento térmico, Si cubierto

Del análisis de las tres variables extraemos primero los estadísticos descriptivos que los presentamos en la siguiente tabla.

Tabla 21

Estadísticos descriptivos Anova para HDPE

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
1	10	163,800	4,8488	1,5333	160,331	167,269	156,0	171,0
2	10	179,000	5,6372	1,7826	174,967	183,033	173,0	189,0
3	10	175,400	5,7581	1,8209	171,281	179,519	169,0	186,0
Total	30	172,733	8,4238	1,5380	169,588	175,879	156,0	189,0

Nota. Estadísticos descriptivos para tres grupos de muestras, fila 1 grupo de control fila 2 muestras cubiertas y fila tres muestras cubiertas que pasaron prueba de temperatura.

Los datos presentados en la Tabla 21, ya fueron reportados en las anteriores tablas para los análisis T-Student, pero esta vez serán usado para ser evaluados simultáneamente, en primer término se evalúa si son comparables entre sí, lo que se determina con la prueba de homocedasticidad de varianzas o igualdad de varianzas lo que presentamos en la Tabla 22.

Tabla 22

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
,284	2	27	,755

Nota. La prueba de Levene analiza los datos y da como respuesta si los grupos de medidas son comparables o no, los mencionados datos se analizan en el software SPSS Statistics.

Como podemos ver en la Tabla 22, la significancia es de 0.755 que al ser mayor a 0.05 entonces se acepta la hipótesis nula que indica que las varianzas son iguales, es decir los grupos de medidas son c ANOVA omparables, seguidamente veremos si los grupos comparados son iguales o existen diferencias entre ellos, para lo cual analizamos el siguiente cuadro proporcionado por la tabla ANOVA entre otros datos importantes.

Tabla 23

ANOVA para HDPE

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1261,867	2	630,933	21,401	,000
Dentro de grupos	796,000	27	29,481		
Total	2057,867	29			

Nota. La tabla Anova da como principal dato la significancia valor que indica si efectivamente los grupos evaluados son estadísticamente iguales o diferentes.

De la Tabla 23, podemos ver como principal dato que la significancia es 0.000, lo que es menor a 0.05, lo que nos indica que si hay diferencias entre los grupos de mediciones, pero esta tabla no nos indica que grupos de mediciones son distintas, lo que se determinara con el método estadístico Bonferroni que es más exacto para casos en las que hay pocas mediciones, en este caso son 10, que se presentan a continuación.

Tabla 24

Prueba de Bonferroni para HDPE

	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
Bonferroni	1 (Grupo de control No recubierta No prueba de temperatura)	2	-15,2000*	2,4282	,000	-21,398	-9,002
		3	-11,6000*	2,4282	,000	-17,798	-5,402
	2 (Geomembranas recubiertas, No prueba de temperatura)	1	15,2000*	2,4282	,000	9,002	21,398
		3	3,6000	2,4282	,449	-2,598	9,798
	3 (Geomembranas recubiertas, Si prueba de temperatura)	1	11,6000*	2,4282	,000	5,402	17,798
		2	-3,6000	2,4282	,449	-9,798	2,598

Nota. Dado que Anova nos indica que, si hay diferencias, pero Bonferroni nos indica entre que grupos hay diferencias dado que son 3 grupos comparados.

De las comparaciones múltiples realizados con Bonferroni presentadas en la Tabla 24, podemos ver que al comparar el grupo 1 con el grupo 2 y 3 sus significancias son menores .05 lo que significa que son diferentes, es decir que el grupo de control en promedio su resistencia es menor tanto en comparación con las muestras cubiertas que pasaron por prueba de temperatura como las que no pasaron prueba de temperatura, como segunda conclusión importante encontramos que la inmersión en líquido lixivante a una mediana temperatura no afectó en nada el desempeño de las geomembranas dado que al comparar 2 con 3 o viceversa el resultado es .449 que es mayor a .05 por tanto se acepta hipótesis nula de igualdad de promedios.

5.1.4. Análisis 4, perforación

Para el análisis de prueba de perforación realizados comparamos los resultados de los grupos de medidas de las geomembranas si recubiertas vs las no recubiertas con la prueba T-Student, para determinar la diferencia estadística, para esto presentamos los datos en la Tabla 25.

Tabla 25

Datos prueba de perforación

Muestra	Fuerza de rotura (N)	
	Sin revestimiento	Con revestimiento
1	510	515
2	525	525
3	500	530
4	508	525
5	495	515
6	506	535
7	510	510
8	511	528
9	529	510
10	495	535

Nota. Se presentan los datos para los dos grupos de medidas tanto las que fueron cubiertas como no cubiertas en la prueba de perforación.

Los estadísticos descriptivos para esta prueba se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26

Estadísticas de grupo

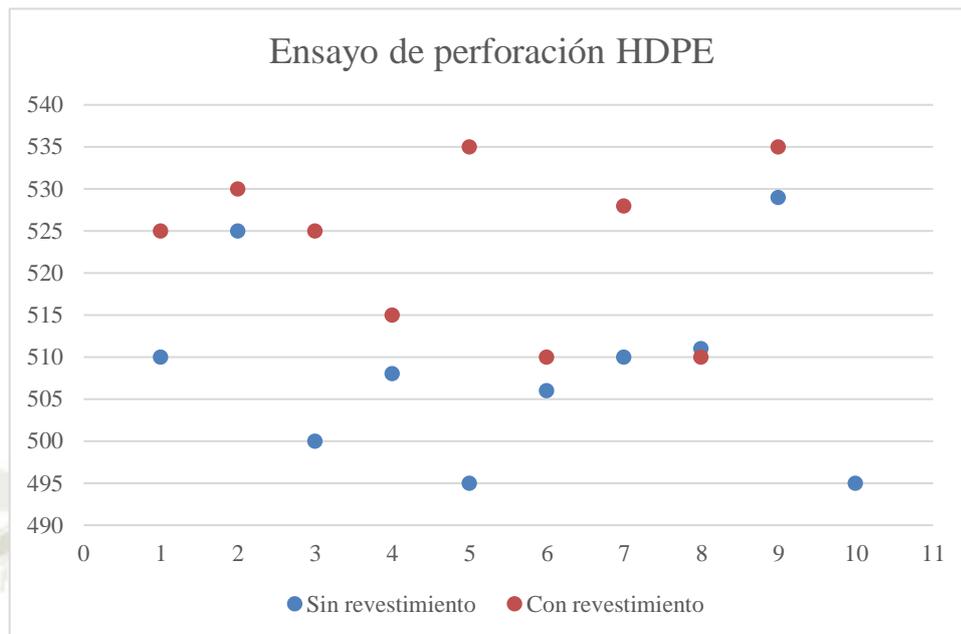
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
No cubierta	1	10	508,900	11,2788	3,5667
Si cubierta	2	10	522,800	9,6356	3,0470

Nota. Estadísticos descriptivos para los dos grupos de medidas mencionados

Como podemos ver de la Tabla 26, los estadísticos descriptivos en promedio la geomembrana requiere de una mayor fuerza para lograr la rotura, pero esto será analizado con mayor exactitud con la prueba T-Student, a continuación, presentamos el gráfico de los datos.

Figura 36

Ensayo de perforación HDPE



Nota. Diagrama de puntos de resultados obtenidos para los dos grupos de datos, geomembranas recubiertas y no recubiertas para prueba de perforación HDPE.

De la Figura 38 podemos ver que hay una importante dispersión de los datos obtenidos lo que comprobaremos con las pruebas estadísticas.

Tabla 27

Prueba T-Student para prueba de perforación HDPE

Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	,003	,959	-2,963	18	,008	-13,9000	4,6910	-23,7554	-4,0446

Nota. Los mencionados datos se analiza en el software SPSS Statistics.

De la Tabla 27 podemos ver que el valor de la significancia para la prueba de Levene nos 0.959 que es mayor a 0.05 que nos indica varianzas iguales, es decir que los grupos de datos pueden ser comparados. Como segunda y más importante conclusión podemos afirmar categóricamente que las geomembranas recubiertas soportan una mayor fuerza de perforación que las geomembranas no recubiertas mostrando las primeras una fuerza promedio de 508.9 frente a 522.8 N de las geomembranas recubiertas.

5.2. Geomembranas de LLDPE

5.2.1. Análisis 1, tracción geomembranas No prueba de temperatura LLDPE

Cómo se describió en el capítulo de metodología si se va a comparar las geomembranas recubiertas con geomembrana no recubiertas ambas no pasaron por prueba de temperatura

De la Tabla 28 podemos ver que en promedio las geomembranas recubiertas tuvieron una mejor resistencia, estos datos los presentamos en la Tabla 28 y Figura 37.

Tabla 28

Datos a analizar prueba con y sin revestimiento No prueba de temperatura.

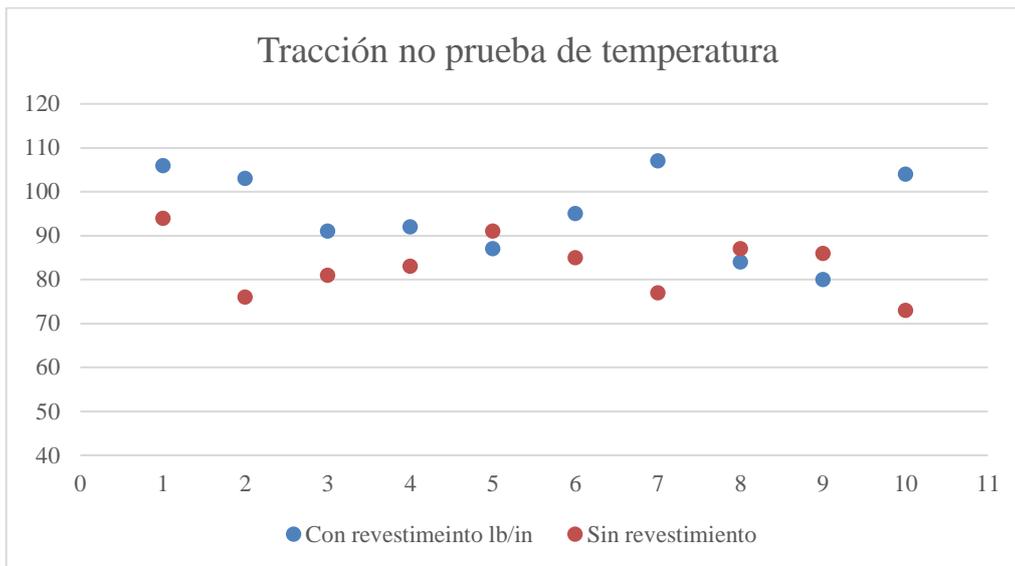
Prueba	Sin revestimiento	Con revestimiento
	lb/in	lb/in
1	94	106
2	76	103
3	81	91
4	83	92
5	91	87
6	85	95
7	77	107
8	87	84
9	86	80
10	73	104

Nota. Para el análisis o la comparación de los grupos de datos se usará T-Student.

Es importante recordar que nos ubicamos dentro de las geomembranas de LLDPE para las muestras que no pasaron prueba de temperatura.

Figura 37

Resultados pruebas de tracción cubiertas vs no cubiertas



Nota. Diagrama de puntos para muestras de prueba de tracción que no pasaron por prueba de temperatura

De la Figura 37 podemos ver que los puntos son cercanos, pero en general las mediciones de las muestras sin revestimiento siempre están por debajo de los resultados con revestimiento.

Tabla 29

Estadísticos descriptivos cubiertas vs no cubiertas

	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
No cubierta	1	10	83,300	6,6841	2,1137
Cubiertas	2	10	94,900	9,6891	3,0639

Nota. Comparación de datos cubiertas vs no cubiertas

En la Tabla 29 presentamos los estadísticos descriptivos para los dos grupos de datos podemos ver que el promedio de las mediciones para de las geomembranas cubiertas es mayor, esto lo corroboramos con el análisis T-Student de la Tabla 30.

Tabla 30

Prueba T-Student para LLPDE

	Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	2,276	,149	-3,116	18	,006	-11,6000	3,7223	-19,4203	-3,7797

Nota. Prueba T-Student desarrollado con el software SPSS Statistics

Vemos del análisis T-Student para estos dos grupos de datos que los dos grupos de datos son comparables, debido al dato 0.149 que nos indica que los grupos de datos son comparables debido a que presentan varianzas similares. De la prueba de significancia vemos que efectivamente los grupos son estadísticamente tienen medias diferentes, comprobándose la diferencia registrada en los promedios reportados.

5.2.2. Análisis 2, tracción geomembranas Si prueba de temperatura LLDPE

Como segundo análisis, estudiamos los resultados de las pruebas que pasaron por prueba de temperatura, es decir que fueron sumergidas 30 días en solución de lixiviación a 50 °C, luego de la mencionada prueba se realizó prueba de tracción obteniendo los resultados presentados en la tabla tanto para geomembranas cubiertas como no cubiertas.

Tabla 31

Resultados prueba de tracción si prueba de temperatura

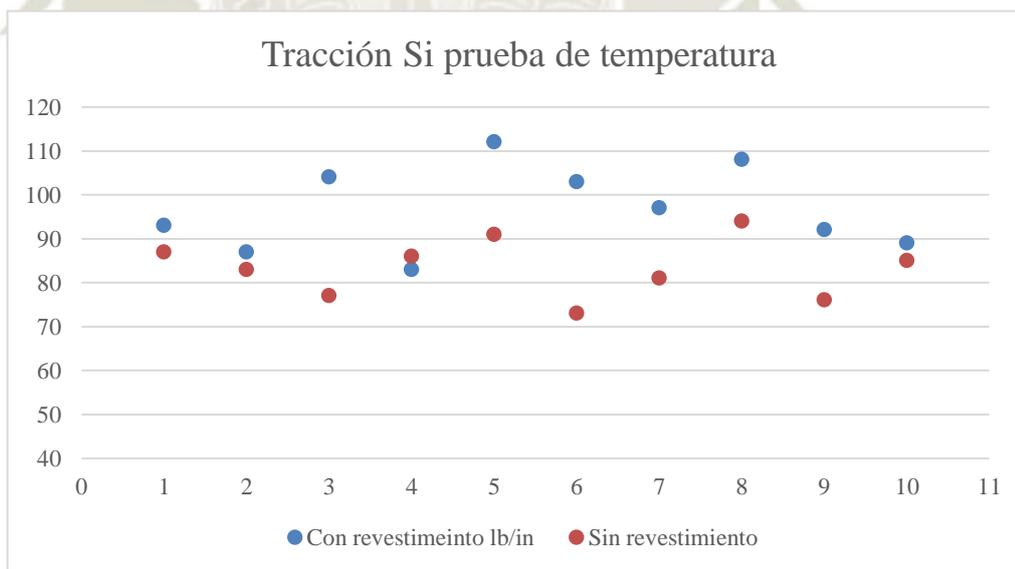
Prueba	Sin revestimiento lb/in	Con revestimiento lb/in
1	87	93
2	83	87
3	77	104
4	86	83
5	91	112
6	73	103
7	81	97
8	94	108
9	76	92
10	85	89

Nota. Datos presentados para realizar la comparación en grupos.

En el gráfico presentamos los datos de la Tabla 31 para una mejor exposición

Figura 38

Datos para si prueba de temperatura LLDPE



De la figura anterior podemos ver que los datos efectivamente son muy cercanos, en la Tabla 32 vemos los estadísticos descriptivos que nos dan una idea mas objetiva sobre la diferencia de los grupos de datos.

Tabla 32

Estadísticos descriptivos pruebas de tracción LLDPE.

	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
No cubierta	1	10	83,300	6,6841	2,1137
Si cubiertas	2	10	96,800	9,6125	3,0397

Nota. Datos estadísticos sobre los dos grupos de medidas.

En promedio las geomembranas recubiertas tienen una mejor resistencia a la tracción esto se verificara con la prueba T-Student debido a que esto podría ser producto del azar o error de un dato que mueva el promedio, esto lo presentamos en la Tabla 33

Tabla 33

Prueba T-Student para tracción Si prueba de temperatura.

	Prueba de Levene de calidad de varianzas		Prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	2,098	,165	-3,646	18	,002	-13,5000	3,7024	-21,2785	-5,7215

Nota. Prueba T-Student desarrollado con el software SPSS Statistics.

De la Tabla 33 podemos ver que para la prueba de Levene sobre calidad de varianzas el valor es 0.165 siendo este valor mayor a 0.05 lo que significa que las varianzas son iguales es decir son grupos de datos comparables o las varianzas son iguales. El segundo dato importante es la significancia bilateral la que es menor a 0.05, con un valor de 0.02, lo que nos indica que efectivamente hay diferencia estadísticamente significativas entre ambos

grupos de mediciones y como ya vimos el grupo con mejor promedio es la de las geomembranas cubiertas con 96.8 frente a 83.3 lb/in que soporta las geomembranas no cubiertas.

5.2.3. Análisis 3, ANOVA para tracción de LLDPE

En la presente desarrollamos el análisis o comparación de tres grupos de medidas, siendo de esta manera nos apoyamos en el análisis ANOVA, los grupos a comparar son los siguientes.

- 1.- Grupo de control, No tratamiento de temperatura No cubierto
- 2.- No tratamiento térmico, Si cubierto
- 3.- Si tratamiento térmico, Si cubierto

En la Tabla 34 presentamos los tres grupos de datos mencionados cabe señalar que ya se realizaron comparaciones que en un caso ya se realizó comparación de dos grupos (control vs no prueba de temperatura si cubierto) pero en este caso se agrega al análisis la tercera columna.

Tabla 34

Datos para ANOVA (lb/pulg)

Prueba	Grupo control	No prueba de temperatura Si recubierta	Si prueba de temperatura Si recubierta
1	94	106	93
2	76	103	87
3	81	91	104
4	83	92	83
5	91	87	112
6	85	95	103
7	77	107	97
8	87	84	108
9	86	80	92
10	73	104	89

Nota. Se denomino grupo de control al grupo que no se recubrio ni paso prueba termica.

Al comparar tres grupos de medidas realizamos el análisis de la varianza con la prueba ANOVA, como vemos el objetivo es saber si hay un efecto en recubrir la geomembrana y además es saber si causo un efecto la prueba de temperatura en mellar las propiedades mecánicas del material, en la Tabla 35 presentamos los estadísticos descriptivos para los tres grupos.

Tabla 35

Estadísticos descriptivos

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
1	10	83,300	6,6841	2,1137	78,518	88,082	73,0	94,0
2	10	94,900	9,6891	3,0639	87,969	101,831	80,0	107,0
3	10	96,800	9,6125	3,0397	89,924	103,676	83,0	112,0
Total	30	91,667	10,4166	1,9018	87,777	95,556	73,0	112,0

Nota. Descriptivos para la anova de LLDPE.

En la Tabla 35 vemos los estadísticos descriptivos en los que destacan las medias que nos indican que los grupos 2 y 3 son parecidos y el grupo 1 es diferente y menor a los otros grupos.

Tabla 36

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
1,358	2	27	.274

Nota. Esta prueba es importante para ver si las variables son comparables

De la Tabla 36 destacamos que la significancia para probar que los tres grupos tienen varianzas iguales nos da un valor de .274 que es mayor a .05 lo que indica que si son varianzas iguales o grupos de datos comparables.

Tabla 37

ANOVA para LLDPE

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1068,067	2	534,033	6,937	.004
Dentro de grupos	2078,600	27	76,985		
Total	3146,667	29			

Nota. El valor de significancia se remarca en amarillo

De la Tabla 37 (ANOVA) destacamos el valor de la significancia da .004 que es menor a .05 lo que indica que existen diferencias entre alguno de los grupos comparados, finalmente aplicamos Bonferroni para determinar en qué grupos se encontraron las diferencias, en la siguiente tabla.

Tabla 38

Bonferroni para datos de tracción de LLDPE

	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
Bonferroni	1	2	-11,6000*	3,9239	.019	-21,616	-1,584
		3	-13,5000*	3,9239	.006	-23,516	-3,484
	2	1	11,6000*	3,9239	.019	1,584	21,616
		3	-1,9000	3,9239	1,000	-11,916	8,116
	3	1	13,5000*	3,9239	.006	3,484	23,516
		2	1,9000	3,9239	1,000	-8,116	11,916

Nota. El valor de significancia menor a 0,05 nos indica que si hay diferencias estadísticamente significativas y si este valor es mayor a 0,05 nos indica que no hay diferencias estadísticamente significativas, además notar que no importa el orden de la comparación es decir es igual comparar 2 con 1 que 1 con 2.

De la Tabla 38 podemos concluir que efectivamente entre la muestra de control y las muestras cubiertas, tanto la que fue sometida a la prueba de temperatura como la que no existe diferencias, es decir no importa que la geomembrana hubiera pasado por la prueba de temperatura si esta recubierta sus propiedades mecánicas son mejores a las geomembranas de control que no fueron recubiertas.

Al analizar si existe alguna diferencia entre geomembranas que fueron y no sometidas a prueba de temperatura encontramos que esta prueba no tuvo ninguna afectación significativa a las propiedades de tracción de la geomembrana.

5.2.4. Análisis 4, Prueba de perforación LLDPE

Al ser dos grupos de mediciones tanto las geomembrana recubiertas como las no recubiertas se realiza la prueba T-Student, para el análisis de estos grupos de medidas y verificar si efectivamente en este tipo de geomembrana también existe una mejoría en las propiedades mecánicas, en la siguiente tabla presentamos los grupos de datos en la Tabla 39 presentándose la fuerza de rotura para ambos grupos.

Tabla 39

Fuerza de rotura

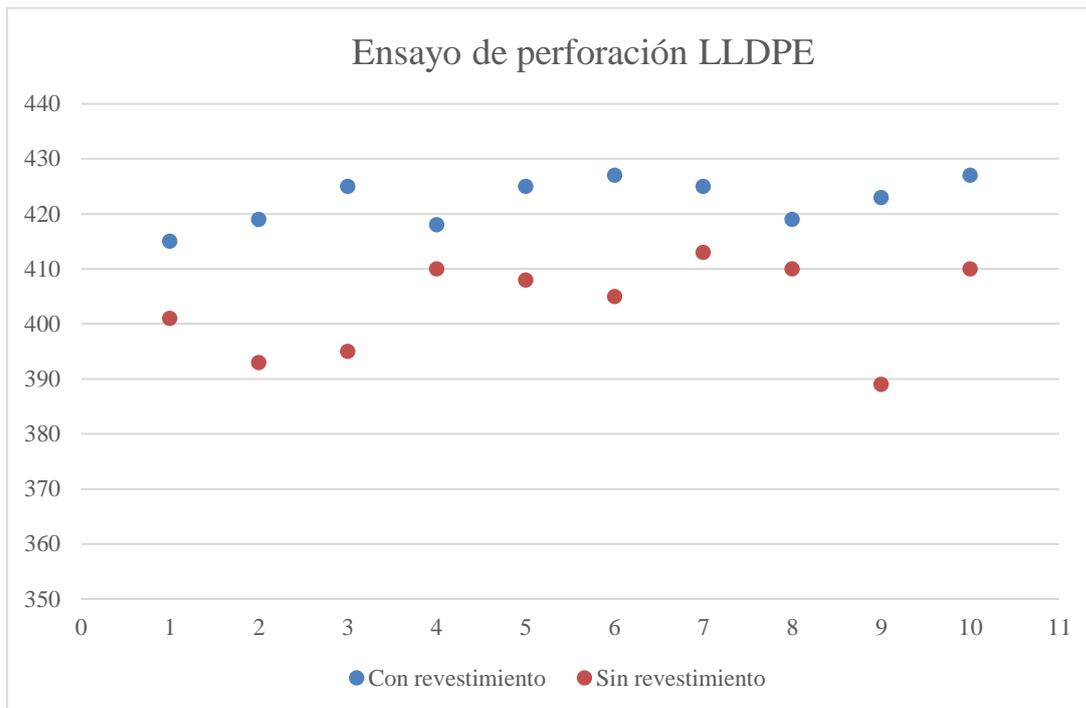
Muestra	Presión de rotura (N)	
	Sin revestimiento	Con revestimiento
1	401	415
2	393	419
3	395	425
4	410	418
5	408	425
6	405	427
7	413	425
8	410	419
9	389	423
10	410	427

Nota. Datos tomados de la fuerza a la que se rompió las muestras de geomembrana con y sin revestimiento.

En la Figura 39, presentamos la gráfica para estos datos obtenidos de la mencionada prueba.

Figura 39

Ensayo de perforación LLDPE



Nota. En este grafico compara los datos para las muestras con y sin revestimiento, para la prueba de rotura.

De la Figura 29 podemos ver como los datos de las geomembranas recubiertas si se encuentran más arriba que las no recubiertas, para verificar esto presentamos los estadísticos descriptivos en la Tabla 40.

Tabla 40

Estadísticos del descriptivos

Estadísticas de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
No cubierta	1	10	403,400	8,4222	2,6633
	2	10	422,300	4,2177	1,3337

Nota. Estadísticos que nos dan una idea al comparar los dos grupos de datos.

De los estadísticos descriptivos podemos ver que, aunque los promedios de mediciones son cercanas el grupo 2 que se refiere a las geomembranas recubiertas siempre

tiene un mejor desempeño comparado a las no recubiertas esto se verificará mejor con la prueba T-Student dado que esto se puede deber al azar, suerte o error en algún dato.

Tabla 41

T-Student para perforación LLDPE

Prueba de muestras independientes									
	Prueba de Levene de calidad de varianzas		Prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	6,852	,017	-6,345	18	,000	-18,9000	2,9786	-25,1579	-12,6421
No se asumen varianzas iguales			-6,345	13,2	,000	-18,9000	2,9786	-25,3228	-12,4772

Nota. Se trabaja con los datos de la fila superior o varianzas iguales.

De la Tabla 41 podemos concluir que los grupos de mediciones si son comparables por el valor de significancia en la prueba de Levene de 0.17 mayor a 0.05, por lo que se asume igualdad de varianzas, como segundo punto se afirma diferencia estadísticamente significativa entre los grupos de medidas por el valor de significancia de 0.00 menor a 0.05, lo que indica que los grupos de medidas son diferentes. Por todo esto concluimos que recubrir la geomembrana de LLDPE con el elemento protector, si tiene un claro impacto en la mejora de las propiedades mecánicas de la misma.

5.3. Consideraciones económicas

El principal motivo del uso del recubrimiento son las consideraciones ambientales, es decir tratar de dar un mayor rango de seguridad a la prevención de fugas de líquidos lixiviados por ruptura de la geomembranas en las pilas de lixiviación, pero esto tiene de

forma tácita una importante implicancia económica ya que actualmente el estado mediante sus organismos de fiscalización ambiental, sancionando con multas de hasta 10 mil UIT, a las empresas que no tengan los cuidados necesarios para evitar derrames de líquidos lixiviados pudiendo llegar la sanción al titular por este motivo a los 44 millones de soles, ver apéndice B Ministerio del ambiente (2012).

El costo de este material no es muy diferente al costo de geomembrana, dado que por cada metro cuadrado se utiliza 1kg de material impermeabilizante, lo que esta valorizado en 31 soles aproximadamente, en la actualidad el precio del metro cuadrado de geomembrana oscila los 35 soles en el mercado local.

Tabla 42

Comparación de geomembrana vs recubrimiento

Material	Costo (S/)
Precio de geomembrana por m ²	31
Precio material de recubrimiento por m ²	35

Nota. La cotización se realizó en empresas del mercado local.

Como podemos ver los costos no son muy diferentes, es decir no se trata de un elemento especialmente caro, por lo que es un motivo más para que se pueda considerar uso en las obras de pozas de lixiviación.

5.4. Validación de hipótesis

5.4.1. Para HDPE

Finalmente aceptamos la hipótesis de estudio, afirmando que efectivamente cubrir las geomembranas con Poliuretano mejora las propiedades mecánicas de la geomembrana obteniéndose en la prueba de tracción una mejora de 163.8 a 179 lb/pulg en promedio, para las muestras que fueron sometidas a prueba de temperatura siendo sumergidas por 30 días en solución de lixiviación a 50 °C, los resultados no fueron muy diferentes concluyendo que

la prueba de temperatura no les causo mayor efecto registrados en la misma mejoría de 163.9 a 175.4 lb/pulg en promedio. Para la prueba de perforación también se registró mejora en las propiedades, pasando de 508.9 a 522,8 N de fuerza que soporta la muestra antes de romper.

5.4.2. Para LLDPE

Del mismo modo para LLDPE podemos afirmar que se acepta la hipótesis de estudio que afirma que efectivamente las propiedades de la geomembrana mejoran notablemente al pasar de 83.3 a 94.9 lb/pulg, en la prueba de tracción. Para las muestras que pasaron por prueba de temperatura es decir sumergirlas por 30 días en solución lixivante a 50°C, los resultados fueron similares, por lo que someterlas a estas posibles condiciones de trabajo no afecto el desenvolvimiento de las geomembranas mejorando del mismo modo entre recubiertas y no recubiertas de 83.3 a 96.8 lb/pulg. Para la prueba de perforación en estas geomembranas también se observó mejora en el soporte pasando de 403.4 a 422.3 N

CONCLUSIONES

Conclusión 1

Para la geomembrana de HDPE se demostró que tras la impregnación de material de recubrimiento con base de Poliurea, las propiedades mecánicas de la geomembrana mejoraron, demostrado con la prueba de resistencia a la tracción de la que en promedio la resistencia a la tracción para el punto de fluencia paso en promedio de 163.8 a 179 lb/pulg luego se realizó la misma prueba para geomembranas que pasaron por una prueba de temperatura basado en estar sumergidas por 30 días a 50 °C, luego se aplicó la misma prueba de tracción demostrándose que la mencionada prueba no tuvo ninguna influencia en las propiedades mecánicas de las geomembranas tanto recubierta como no recubierta. Para la prueba de perforación se demostró que en promedio se necesita una mayor fuerza para lograr perforar la geomembrana pasando de 508.9 a 522.8 Newton.

Conclusión 2

Para la geomembrana de LLDPE se realizaron las mismas pruebas, en la prueba de tracción se demostró que la geomembrana mejoro sus propiedades mecánicas luego del recubrirlas con Poliurea, pasando de 83.3 a 94.9 y 96.8 lb/pulg en promedio, correspondiendo la primera medida al grupo de control y la segunda y tercera a las geomembranas que pasaron por prueba de temperatura y que no pasaron por la prueba de temperatura respectivamente, del mismo modo se demostró que no hay mayor influencia de la prueba de temperatura ya que estadísticamente no se demostró diferencias. Para la prueba de perforación se demostró una mejora en la fuerza de rotura de las geomembranas pasando en promedio de 403.4 a 422.3 Newton.

RECOMENDACIONES

Recomendación

Se recomienda su uso para zonas donde el personal considere que las geomembrana estará sometida a esfuerzos más elevados o donde la geografía de la zona sea muy complicada o zonas donde se hayan realizado muchas soldadura o puntos de unión como parches conexiones geometrías complejas dado que es conocido que el enemigo de la geomembrana es la elevada temperatura ya que meya notablemente sus propiedades mecánicas y una soldadura de geomembrana se puede llegar hasta los 400 °C.

Recomendación

Se recomienda a los especialistas en la materia poder realizar pruebas de adherencia, en las pruebas de tracción realizadas se verificó la excelente adherencia del material, pero es necesario documentar este punto.

REFERENCIA

- Aristegui maquinaria. (2021). *Soldadura por cuña caliente*. Obtenido de Seleccionamos Soluciones en maquinaria de Soldadura: <https://www.aristegui.info/metodos-de-union-para-geomembranas-de-poli-etileno/>
- ASTM 6241. (2021). *Método de prueba estándar para resistencia a la perforación estática de geotextiles y productos relacionados con geotextiles utilizando una sonda de 50 mm*. Obtenido de ASTM International West Conshohocken: <https://www.astm.org/Standards/D6241.htm>
- Baldiga, C., & Prota, S. (2017). Conferencia internacional de tecnología aplicación de geosintéticos. Chile.
- Beck, A. (2006). *Frecuencia de agujeros en geomembranas*.
- Broggi, I. (16 de Abril de 2015). *Blog de hidrometalurgia y lixiviación*. Obtenido de hidrometalurgia Peru: <https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/2015/04/16/hola-mundo/>
- Durand. (2018). *IGS*. Obtenido de Funciones de los Geosintéticos: <https://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/plugins/resources/documents/Functions/Espanol.pdf>
- Eieinstrument. (2020). *Agarre manual de prueba de resistencia a la perforación CBR*. Obtenido de Estándares de cumplimiento: ASTM D6241, ISO 12236: <https://www.eieinstruments.com/geotextile/astm-d6241-mechanical-gripping-cbr-puncture-test>
- Emaresa. (2018). *Construcción y geosintéticos*. Obtenido de Geomembrana Lisa HDPE: <https://emaresa.cl/producto/geomembrana-lisa-hdpe-gm13/>

Geosynthetic Institute. (9 de Setiembre de 2019). *GRI - Especificación estándar GM13*.

Obtenido de Métodos de prueba, propiedades de prueba y frecuencia de prueba para Polietileno de alta densidad (HDPE) Geomembranas lisas y texturizadas.

GrupoGHA. (2020). Obtenido de ¿Qué son los geosintéticos y para qué se usan?:

<https://grupogha.com/2020/12/09/que-son-los-geosinteticos-y-para-que-se-usan/>

IGC. (16 de Noviembre de 2018). *Innovación en geosintéticos y construcción*. Obtenido de

<https://igc.com.pe/conoce-los-5-tipos-de-geosinteticos-mas-solicitados/>

IGC. (2019). *¿Qué factores pueden provocar fallos en las geomembranas?* Obtenido de

Innovacion de geosinteticos y construccion: <https://igc.com.pe/factores-provocar-fallos-en-las-geomembranas/>

IGC. (17 de Abril de 2020). *Innovacion en geosintéticos y construccion* . Obtenido de

¿CONOCES LAS APLICACIONES DE LAS GEOMEMBRANAS DE HDPE?:

<https://igc.com.pe/conoces-aplicaciones-de-las-geomembranas-de-hdpe/>

Knight Piésold Consultores. (2010). *Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. EIA Proyecto*

Plataforma de Lixiviación 4B (PAD 4B). Obtenido de Ministerio de energia y

minas: <http://www.minem.gob.pe/descripcion.php?idSector=4&idTitular=1190>

Luiz Lavoie, F., Kobelnik, M., & Apareci, C. (Mayo de 2020). *Durabilidad De Las*

Geomembranas De HDPE. Obtenido de Scielo Brasil:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/Lzs4r38JshYFrXKhHfhh6fP/?lang=en>

Ministerio del ambiente. (12 de Noviembre de 2012). *Decreto Supremo N° 007-2012-*

MINAM .- Aprueban Cuadro de Tipificación de Infracciones Ambientales y Escala

de Multas y Sanciones aplicables a la Gran y Mediana Minería respecto de

Labores de Explotación, Beneficio, Transporte y Almacenamiento de Concentrad.

Obtenido de SINIA sistema nacional de informaicon ambiental:

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-cuadro-tipificacion-infracciones-ambientales-escala-multas>

Omali. (2020). *Servicios*. Obtenido de Instalacion de geomembranas:

<https://omali.com.gt/servicios/instalacion-de-geomembrana/>

Real Academia Española. (2021). *Diccionario de la lengua española*. Madrid.

Rumbo Minero. (22 de Julio de 2016). Obtenido de Geosintéticos: SOLUCIONES QUE IMPERMEABILIZAN Y PROTEGEN:

[https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-](https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-impermeabilizan-y-)
[impermeabilizan-y-](https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-impermeabilizan-y-)

[protegen/#:~:text=Geosint%C3%A9ticos%3A%20SOLUCIONES%20QUE%20IM](https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-impermeabilizan-y-)
[PERMEABILIZAN%20Y%20PROTEGEN,-](https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-impermeabilizan-y-)

[22%20Julio%2C%202016&text=Dentro%20del%20sector%20minero%2C%20su,e](https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-impermeabilizan-y-)
[rosi](https://www.rumbominero.com/revista/informes/geosinteticos-soluciones-que-impermeabilizan-y-)

Salas, W. (Agosto de 2019). *Lixiviación cuajone* . Obtenido de Southern copper.

Sampieri, H. (2014). *Metodología de la investigación* . Mexico DF: MC Graw Hill.

Sika. (2021). *Sistema de membrana aplicada por proyección*. Obtenido de BIMobject

logo: https://www.bimobject.com/es/sika/product/sikalastic_841_st

Smith, M., & Breitenbach, A. (Diciembre de 2007). *Historia de la geomembrana en la*

industria minera. Obtenido de Minería y medio ambiente :

[https://docplayer.es/12403165-La-historia-de-las-geomembranas-en-la-industria-](https://docplayer.es/12403165-La-historia-de-las-geomembranas-en-la-industria-minera.html)
[minera.html](https://docplayer.es/12403165-La-historia-de-las-geomembranas-en-la-industria-minera.html)

Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. (2012). *Reunión Nacional de Mecánica de*

Suelos e Ingeniería Geotécnica. Obtenido de Efecto de la velocidad de deformación
en la resistencia a la tensión de:

https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/15_Geotecnia_ambiental_y_depositos_mineros/I14PAPN_1.pdf

Sociedad minera cerro verde. (17 de Marzo de 2017). *Lecciones Aprendidas de la Operación del Pad de Lixiviación 4A*. Obtenido de

<https://www.slideshare.net/edmundoprado-barzola/pad-fallas>

Southern Copper. (2018). *Walter Salas, Jefe De Lixiviacion Cuaajone*. Obtenido de

<https://www.youtube.com/watch?v=S34WI0P44KA>

Tecnología de los Plásticos. (05 de Diciembre de 2012). *Poliurea*. Obtenido de Blog

dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado:

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/12/poliurea.html>

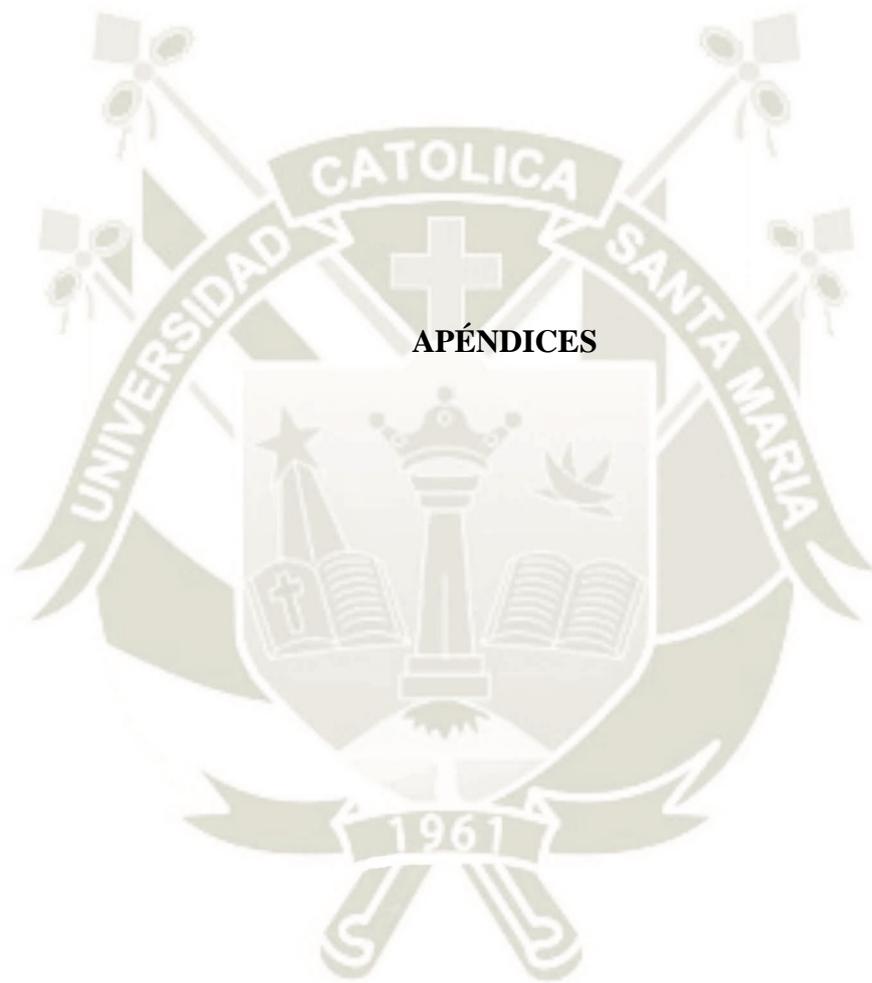
Tecnologías en soldadura plastica. (2018). *Equipo De Termofusión Con Cuña Caliente*.

Obtenido de <http://herraplas.mx/portfolio-item/equipo-termofusion-cuna-caliente-wedge-it/>

Universidad Politécnica de Valencia . (Febrero de 2020). *Polímeros Termoplásticos*.

Obtenido de Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales:

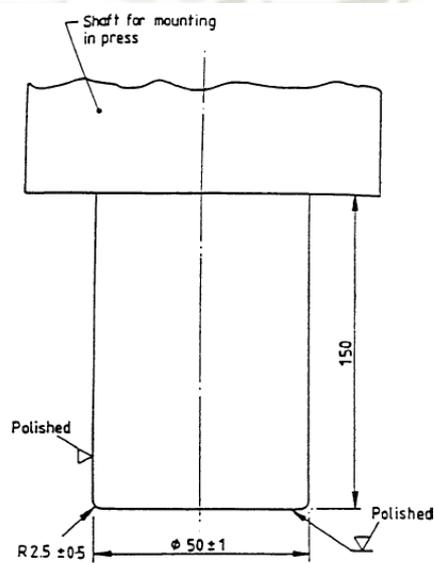
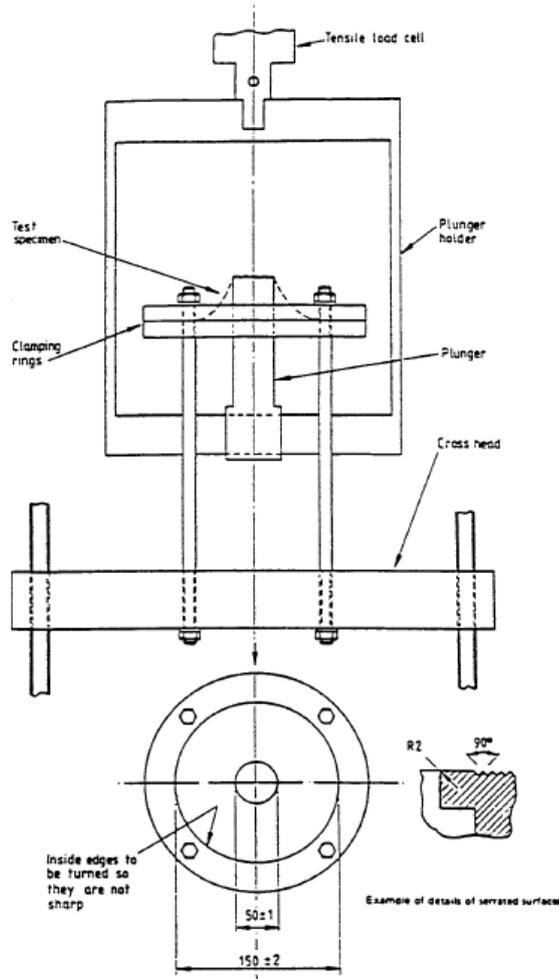
https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_3.html



Apéndice A

Prueba de perforado

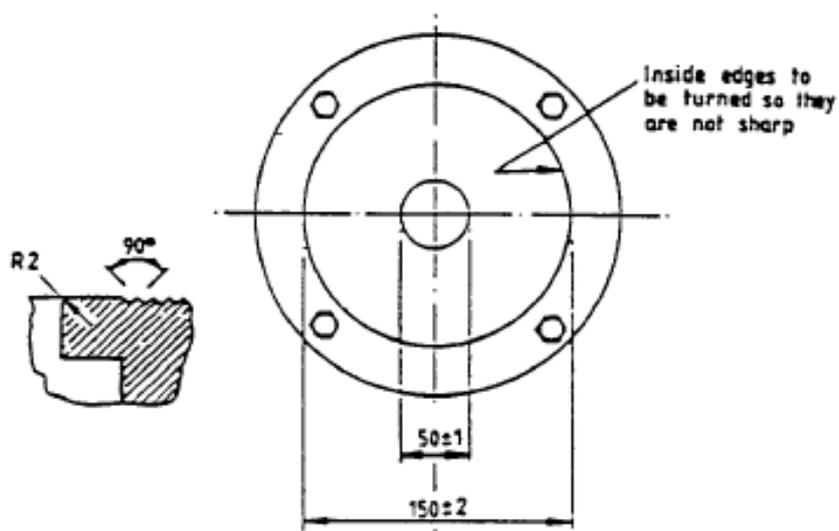
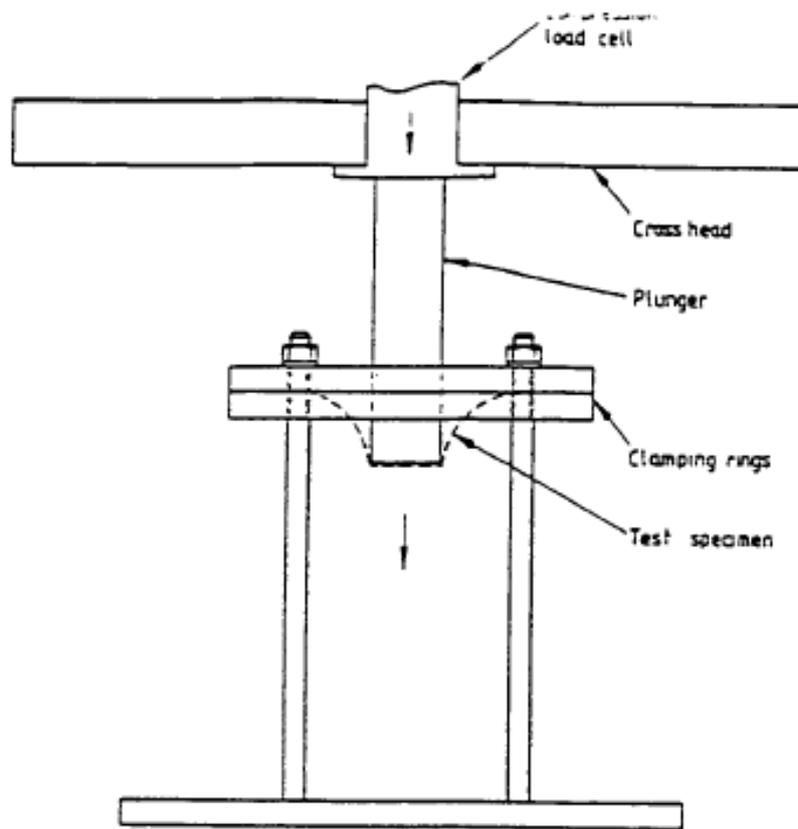
D 6241 - 04



Apéndice A1

Especificaciones para procedimiento de perforación norma ASTM D6241

ASTM D 6241 - 04



Apéndice B

Sanciones económicas por fugas o derrames

478352		NORMAS LEGALES		El Peruano Lima, sábado 10 de noviembre de 2012	
2.10.3	No adoptar los mecanismos de participación ciudadana adicionales a los establecidos para la aprobación y modificación del Plan de Cierre de Minas, que determine la autoridad competente cuando se aproxime el cese de operaciones mineras.	Artículo 16° del RPCSM Artículo 35° del PPCSM	Hasta 260 UIT	-	GRAVE
2.10.4	No implementar los mecanismos de participación ciudadana durante la ejecución del proyecto.	Artículo 15° del RPCSM	Hasta 260 UIT	-	GRAVE
3	OBLIGACIONES ESPECIFICAS PARA EL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN, BENEFICIO, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE CONCENTRADOS DE MINERAL				
3.1	No evitar fugas o derrames que afecten negativamente el ambiente.	Artículo 5° del RPAAMM Artículo 5° del DLAM	Hasta 10000 UIT	PA/RA/DTD	MUY GRAVE
3.2	No realizar un adecuado manejo, almacenaje y manipuleo de los concentrados de minerales en depósitos de almacenamiento ubicados fuera de las áreas de las operaciones mineras; así como de las emisiones, vertimientos y ruidos que se produzcan en sus instalaciones.	Artículo 5° del DLAM	Hasta 10000 UIT	CTPT/CTPD/DTD	MUY GRAVE
3.3	No coleccionar, transportar, manejar y de ser el caso no tratar, antes de su descarga, las aguas del proceso, las aguas industriales y otras aguas residuales.	Artículo 5°, 6° y 35° del RPAAMM	Hasta 10000 UIT	PA/RA	MUY GRAVE
3.4	En el caso de operaciones de beneficio, no contar con sistemas de colección y drenaje de residuos y derrames y sistemas de almacenamiento para casos de contingencia.	Artículo 32° del RPAAMM	Hasta 10000 UIT	PA/RA	MUY GRAVE
3.5	No garantizar la estabilidad estructural, física y/o química de los depósitos de relaves o escorias en operación y en su abandono definitivo.	Artículos 37°, 38° y 39° del RPAAMM	Hasta 8500 UIT	-	MUY GRAVE
3.6	No adoptar las acciones para el diseño y dimensión de las capacidades de las canchas de lixiviación.	Artículo 40° del RPAAMM	Hasta 10000 UIT	-	MUY GRAVE
3.7	No adoptar medidas para evitar el ingreso de animales pedestres a cancha de lixiviación.	Artículo 40° del RPAAMM	Hasta 1100 UIT	PA/RA	GRAVE
4	OBLIGACIONES RELATIVAS AL PLAN DE CIERRE DE MINAS				