

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD
FÍSICA PARA SISTEMAS DE COBERTURA CON
GEOSINTÉTICOS EN EL CIERRE DE MINAS”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

ELARD ROQUE QUISPE ASTETE

ASESOR

M.Sc. DENYS PARRA MURRUGARRA

LIMA - PERÚ

2020

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Quispe Astete, Elard Roque

elard.quispe.a@uni.pe

Dedico este trabajo a mi familia, maestros y amigos, cuya confianza, ejemplo y apoyo han sido la mayor motivación en cada paso y decisión importante de mi vida.

A todos aquellos que se esfuerzan por superarse a sí mismos afrontando nuevos retos con entusiasmo y disciplina.

A quienes a través de su liderazgo y esfuerzo contribuyen en hacer del Perú un país mejor.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación es el resultado de un esfuerzo continuo que ha contado con el apoyo de distintas personas en cada una de sus etapas, desde el planteamiento de la idea inicial hasta su culminación. Agradezco de forma especial a mi asesor de tesis, Denys Parra, así como a Waldo Huallanca y Selene Quispe, quienes me brindaron la oportunidad de participar en este proyecto de investigación; sin duda, los resultados obtenidos no habrían sido posibles sin su iniciativa, así como sus sugerencias, aportes y rigurosidad en cada etapa del proyecto.

Agradezco a la empresa Anddes Asociados por el soporte financiero brindado para el desarrollo de esta investigación y a todo el equipo de GeoLab por su apoyo en la ejecución de los ensayos de laboratorio.

Agradezco a mi alma máter, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), por todos los aprendizajes y experiencias que fueron parte de mi formación universitaria que ha sido, sin duda, una de las experiencias más valiosas y significativas en mi vida.

A todos mis maestros y compañeros en la UNI, les agradezco infinitamente el tiempo y esfuerzo compartido durante cinco años, en especial, al Dr. Zenón Aguilar y al M.Sc. Leonardo Flores, su rigurosidad, confianza y ejemplo permanente han sido una fuente de motivación muy importante. Asimismo, agradezco a todos los miembros del GeoGroup por compartir conmigo su motivación por la ingeniería geotécnica, tendrán siempre mi estima y admiración.

La motivación y fuerza que me han permitido cumplir con esta meta tan importante se lo debo completamente a mis padres, Emeterio Roque y Luz Mery, y mis hermanos, Pilar, Danitza y Gonzalo, mi mayor gratitud es y será siempre para ellos; contar con su amor, confianza y apoyo incondicional es lo más valioso que me ha permitido alcanzar cada uno de mis objetivos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	7
PRÓLOGO	9
LISTA DE TABLAS.....	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS.....	18
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	20
1.1 GENERALIDADES	20
1.2 PROBLEMÁTICA	21
1.3 OBJETIVOS	23
1.3.1 Objetivo General.....	23
1.3.2 Objetivos Específicos	23
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	24
2.1 CIERRE DE MINAS.....	24
2.1.1 Antecedentes	24
2.1.2 Normatividad	25
2.1.3 Plan de cierre de minas.....	25
2.2 PASIVOS AMBIENTALES.....	26
2.2.1 Manejo de pasivos ambientales.....	27
2.2.2 Inventario de pasivos ambientales en Perú	28
2.3 DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM).....	29
2.3.1 Mecanismo de formación del DAM	30
2.3.2 Efectos del DAM en el medio ambiente	30
2.4 COMPONENTES MINEROS CON MATERIAL GENERADOR DE DAM ..	31
2.4.1 Depósitos de relave.....	32
2.4.2 Depósitos de desmonte de mina	33
2.4.3 Pilas de lixiviación	33
2.5 GEOSINTÉTICOS	34
2.5.1 Geomembranas.....	35
2.5.2 Revestimiento geosintético de arcilla (GCL)	38
2.5.3 Geomallas	41
2.6 RESISTENCIA CORTANTE EN INTERFASES CON GEOSINTÉTICOS ..	45
2.6.1 Estimación de la resistencia cortante en interfases	46
2.6.2 Ensayo de corte directo a gran escala.....	47

2.6.3	Factores que influyen en la resistencia cortante	49
2.6.4	Reducción de la resistencia cortante post-pico.....	51
2.6.5	Selección de la resistencia cortante pico o residual.....	52
2.7	ENFOQUES DE DISEÑO DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO	53
2.7.1	Enfoque de diseño determinístico.....	54
2.7.2	Enfoque de diseño basado en la confiabilidad (probabilístico).....	56
	CAPÍTULO III: SISTEMAS DE COBERTURA CON GEOSINTÉTICOS.....	62
3.1	COBERTURAS DE CIERRE	62
3.1.1	Componentes principales	63
3.1.2	Factores que influyen en su desempeño	64
3.1.3	Ventajas y limitaciones del uso geosintéticos en coberturas.....	66
3.2	INFLUENCIA Y EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN LA ESTABILIDAD FÍSICA.....	69
3.2.1	Espesor de saturación.....	71
3.2.2	Influencia en la cobertura de suelo	72
3.2.3	Influencia en los esfuerzos sobre la capa de revestimiento	73
3.3	INFLUENCIA Y EVALUACIÓN DE LA CARGA SÍSMICA EN LA ESTABILIDAD FÍSICA.....	74
3.3.1	Evaluación de peligro sísmico	75
3.3.2	Análisis de respuesta sísmica.....	75
3.3.3	Estimación de la resistencia cortante en condición dinámica.....	75
3.3.4	Análisis pseudoestático y análisis de desplazamientos permanentes..	76
3.4	EVALUACIÓN DE CARGAS DE TENSIÓN EN GEOSINTÉTICOS	77
3.4.1	Enfoque basado en el método de equilibrio límite (MEL)	78
3.4.2	Enfoque basado en el método límite (ML)	79
3.4.3	Enfoque basado en la columna compuesta simple (CCS)	80
3.4.4	Comparación de enfoques para la estimación de tensiones	83
3.4.5	Resistencia admisible en cargas de tensión	85
3.5	SISTEMAS DE COBERTURA CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO	85
3.5.1	Sistema de cobertura con GM (Tipo I)	86
3.5.2	Sistema de cobertura con GCL (Tipo II).....	87
3.5.3	Sistema de cobertura con GM y GCL (Tipo III)	88
3.6	ESTUDIOS ANTERIORES DE RESISTENCIA CORTANTE EN INTERFASES	88
3.6.1	Interfase GM - SG	89
3.6.2	Interfase GM - SBP	90

3.6.3	Interfase GCL - SG	91
3.6.4	Interfase GM - GCL	92
CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO EN SUELOS FINOS, SUELOS GRANULARES E INTERFASES.....		94
4.1	MUESTRAS DE SUELO Y GEOSINTÉTICOS	94
4.1.1	Muestras de suelo	94
4.1.2	Muestras de geosintéticos	95
4.2	ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS	99
4.2.1	Ensayos estándares	99
4.2.2	Ensayos especiales.....	100
4.3	ENSAYOS EN INTERFASES CON GEOSINTÉTICOS	102
4.3.1	Ensayos de corte directo a gran escala (LSDS).....	102
4.3.2	Resultados obtenidos y comparación con estudios anteriores.....	104
4.3.3	Contraste de la resistencia cortante pico y residual	111
4.3.4	Contraste de la resistencia cortante en función al desplazamiento....	112
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE COBERTURA CON GEOSINTÉTICOS		116
5.1	MÉTODOS DE ANÁLISIS APLICADOS EN EL ESTUDIO.....	116
5.1.1	Método de análisis determinístico.....	116
5.1.2	Método de análisis probabilístico (basado en el enfoque RBD)	124
5.2	ANÁLISIS PARAMÉTRICO	127
5.2.1	Influencia de las condiciones de servicio	129
5.2.2	Influencia de la resistencia cortante de la interfase.....	130
5.2.3	Influencia de las propiedades del suelo de la cobertura.....	130
5.2.4	Influencia de las características geométricas de la cobertura	131
5.2.5	Influencia de la tensión en geosintéticos y las rigideces axiales	133
5.3	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA DETERMINÍSTICO	138
5.3.1	Superficies de falla de análisis.....	139
5.3.2	Inclinaciones y alturas de talud.....	140
5.3.3	Condiciones de servicio y factores de seguridad mínimos	140
5.3.4	Casos de análisis	141
5.3.5	Presentación y discusión de resultados.....	144
5.4	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PROBABILÍSTICO.....	153
5.4.1	Variables aleatorias y parámetros estadísticos.....	153
5.4.2	Generación de ábacos con índices de confiabilidad	155
5.4.3	Presentación y discusión de resultados.....	157

CONCLUSIONES.....	163
RECOMENDACIONES.....	167
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168
ANEXOS	178

RESUMEN

El presente estudio presenta el análisis de la estabilidad física de sistemas de cobertura con geosintéticos que pueden ser colocados en el cierre de depósitos de residuos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos de desmonte y pilas de lixiviación. El revestimiento con geosintético evita el ingreso de agua y, por consiguiente, también evita la generación de drenaje ácido y reduce el riesgo de contaminación en el ecosistema. Este geosintético debe ser impermeable y tener una gran durabilidad, lo cual le proporciona ventajas en comparación con coberturas de suelo tradicionales que usan suelo de baja permeabilidad. Asimismo, los geosintéticos son útiles cuando no se tienen canteras cercanas de suelo de baja permeabilidad cerca al proyecto o cuando la compactación mecánica llega a ser una tarea difícil debido a taludes muy empinados.

Si bien es cierto que los sistemas de cobertura con geosintéticos tienen ventajas frente a sistemas de cobertura tradicionales, problemas en la estabilidad física como el deslizamiento sobre la cobertura podrían ser causados por el peso propio, fuerzas sísmicas o fuerzas de filtración, lo cual incrementa los costos de reparación y mantenimiento. El diseño de coberturas de cierre para depósitos de residuos mineros es cada vez más común, por lo tanto, se hace necesario disponer de criterios y herramientas que faciliten el análisis y diseño geotécnico, más aun considerando que la estabilidad física es afectada por precipitaciones y eventos sísmicos que son frecuentes donde se ubican la mayoría de unidades mineras.

Este estudio evalúa las condiciones de estabilidad física en sistemas de cobertura que incluyen geosintéticos como geomembrana de LLDPE y GCL, colocados sobre taludes entre 1,5H:1V y 3,5H:1V. Previamente, a fin de analizar la estabilidad, la resistencia cortante de las interfases generadas por los geosintéticos y materiales adyacentes fue estimada mediante ensayos de corte directo a gran escala. Asimismo, se realizó un análisis paramétrico con el fin de conocer la influencia de las variables de diseño en la obtención de *FS*. Posteriormente, a través de múltiples análisis realizados considerando diferentes propiedades de la cobertura de suelo, configuraciones geométricas y condiciones de servicio, en una matriz se brindan recomendaciones para el diseño de sistemas

cobertura con geomembrana y GCL para diferentes inclinaciones de talud, incluyendo los tipos de reforzamiento que son aplicables.

Finalmente, basados en el enfoque de diseño por confiabilidad, se han propuesto ábacos de diseño en función a índices de confiabilidad que serán útiles para el diseño preliminar de sistemas de cobertura en proyectos mineros.

Palabras clave: estabilidad de sistemas de cobertura, geosintéticos, resistencia cortante en interfases, reforzamiento, diseño basado en confiabilidad.

ABSTRACT

This study presents the physical stability analysis of cover systems with geosynthetics that could be placed in the closure of slopes for mining waste storage facilities, such as tailings dams, mine waste dumps and heap leach pads. A geosynthetic liner prevents water ingress avoiding the acid rock drainage and reducing the risk of ecosystem contamination. This geosynthetic must be impermeable and has a high durability, which provides advantages when compared with traditional cover systems that use a layer of low permeability soil. In addition, geosynthetics are useful when borrow source of low permeability soil is not available close to the project, or when the compaction become a difficult process due to steep slopes.

Although cover systems with geosynthetics have advantages over traditional soil cover systems, stability problems can happen such as soil cover slide down over the geosynthetic, which could be caused by own weight, seismic forces or seepage forces, which increases the remediation and maintenance costs. The design of cover systems for mine facilities is getting more common, therefore, criteria and tools that are useful in the geotechnical analysis and design are necessary, even more considering that physical stability is affected by rainfalls and seismic events that are frequent where most of mines are located.

This work evaluates the conditions of physical stability in cover systems that include geosynthetics like LLDPE geomembrane and geosynthetic clay liner (GCL) placed on slopes between 1,5H:1V and 3,5H:1V. Previously, in order to analyze the stability, shear strength of the interfaces generated by geosynthetics and adjacent materials was estimated carrying out large scale direct shear tests. Likewise, a parametric analysis was performed in order to know the influence of the design parameters on the obtained factor of safety. Then, based on multiple analyzes performed considering different soil properties, geometric configurations and service conditions, recommendations for the design of cover systems with GCL and geomembrane in different slope inclinations are indicated in a matrix, including the types of reinforcement that are applicable.

Finally, based on a reliability-based approach, design charts in function of reliability indexes are proposed, which will be useful for preliminary design of cover systems in mining projects.

Keywords: cover system stability, geosynthetics, interface shear strength, reinforcement, reliability-based design.

PRÓLOGO

El presente trabajo fue desarrollado a partir de un proyecto de investigación patrocinado por el Área de Investigación de la empresa Anddes Asociados SAC (Anddes) que obtuvo la calificación de Proyecto de Investigación Científica por CONCYTEC.

El cierre de instalaciones mineras es uno de los aspectos más importantes al final de la vida de un depósito de residuos mineros y de la propia operación minera, ya que la ley obliga a garantizar la estabilidad física, hidrológica y geoquímica de la instalación a ser cerrada, de tal manera que se eviten los efectos adversos de una potencial falla del depósito de residuos o la generación de efluentes contaminantes, más aun considerando que dicha instalación quedará en el lugar del proyecto de manera perpetua.

Uno de los grandes méritos de este trabajo es haber realizado una cantidad importante de ensayos de laboratorio de corte directo a gran escala, necesarios para la determinación de la resistencia cortante de interfase conformadas por suelo y geosintético lo cual depende de la configuración final que indica el diseño para la cobertura de cierre de depósitos de residuos mineros. Estos ensayos fueron realizados con el soporte económico de Anddes y su laboratorio geotécnico.

La investigación llevada a cabo comprende el análisis de estabilidad física de tres tipos de sistemas de cobertura aplicables en el cierre de depósitos de residuos mineros, utilizando geosintéticos como geomembrana y GCL como material de revestimiento para la cobertura. El análisis fue realizado considerando la influencia de la carga sísmica, el flujo de agua y la tensión de reforzamiento en la estabilidad física.

El modelo analítico empleado en el análisis de estabilidad de las coberturas no solo considera el equilibrio de fuerzas, sino también la compatibilidad de deformaciones en el análisis de cargas de tensión y compresión, lo cual permite una evaluación más exacta de la necesidad de reforzamiento en la estabilidad de la cobertura.

El análisis determinístico fue realizado sobre un caso base, considerando diferentes alturas, inclinaciones de talud y tensiones de reforzamiento. En base a

ello, se ha propuesto una matriz donde se indican las condiciones de estabilidad necesarias para los sistemas de cobertura analizados. Este análisis fue complementado con el análisis probabilístico basado en la teoría de confiabilidad, con el propósito de incluir la influencia de la variabilidad de los parámetros de diseño en la evaluación de la estabilidad física. A partir de ello, también se han propuesto ábacos con índices de confiabilidad que pueden ser aplicables en el diseño preliminar de sistemas de cobertura para proyectos mineros.

Es importante reconocer el valioso aporte de este tipo de trabajos para la ingeniería de nuestro país, ya que como parte de la tesis se proporcionan recomendaciones prácticas que facilitan el proceso de diseño de coberturas con geosintéticos para instalaciones mineras, sobre todo porque en el futuro cercano se presentarán muchas oportunidades de desarrollar proyectos de este tipo en una importante cantidad de operaciones mineras en el Perú, cuyos depósitos de residuos deberán ser cerrados requiriéndose de ingeniería de alta calidad para tal fin.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Cantidad estimada de sitios mineros huérfanos o abandonados.	27
Tabla 2.2 Residuos mineros identificados como pasivos ambientales en minas abandonadas o huérfanas en Perú.	28
Tabla 2.3 Fuentes de generación de drenaje ácido de mina.	29
Tabla 2.4 Principales propiedades y estándares de referencia para ensayos en geomembranas de HDPE y LLDPE.	37
Tabla 2.5 Propiedades principales, componentes (geotextil y bentonita) y estándares de referencia para ensayos de laboratorio en GCL.	41
Tabla 2.6 Propiedades principales de geomallas y estándares de referencia para ensayos de laboratorio.	45
Tabla 3.1 Características principales de las capas que conforman un sistema de cobertura típico.	64
Tabla 3.2 Ventajas y desventajas del uso de GCL.	68
Tabla 3.3 Comparación de enfoques para la estimación de cargas de tensión en geosintéticos.	84
Tabla 3.4 Parámetros de resistencia cortante pico en interfase GM-SG ($\sigma_n < 30$ kPa).	90
Tabla 3.5 Parámetros de resistencia cortante pico y residual en interfase GM – SBP ($\sigma_n < 50$ kPa).	91
Tabla 3.6 Parámetros de resistencia cortante pico y residual en interfase GCL-SG ($\sigma_n < 50$ kPa).	92
Tabla 3.7 Parámetros de resistencia cortante pico y residual en interfase GM - GCL, para σ_n bajos.	93
Tabla 4.1 Características principales de la geomembrana de LLDPE empleada en el estudio.	96
Tabla 4.2 Características principales del GCL empleado en el estudio.	98
Tabla 4.3 Resumen de ensayos de clasificación SUCS.	99
Tabla 4.4 Resumen de ensayos Proctor estándar.	100
Tabla 4.5 Resumen de ensayos de permeabilidad de pared rígida en suelos granulares.	100
Tabla 4.6 Resumen de ensayos de permeabilidad de pared flexible en SBP. .	101
Tabla 4.7 Resumen de ensayos de corte directo a gran escala realizados por cada tipo de interfase.	103

Tabla 4.8 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfases GM-SG.	105
Tabla 4.9 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfases GM-SBP.	106
Tabla 4.10 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfases GCL-SG.	108
Tabla 4.11 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfases GM-GCL.	109
Tabla 5.1 Variables consideradas en el análisis paramétrico.	128
Tabla 5.2 Condiciones de servicio, rango de análisis y valores de <i>FS</i> aceptables mínimos.	141
Tabla 5.3 Resumen de parámetros de resistencia cortante residual empleados en el análisis de estabilidad de sistemas de cobertura.	142
Tabla 5.4 Resumen de parámetros de rigidez axial empleados en la evaluación del reforzamiento.	143
Tabla 5.5 Rangos de altura, coeficiente sísmico y carga hidráulica donde se cumplen los <i>FS</i> mínimos para cada condición de servicio.	145
Tabla 5.6 Resumen de resultados de los análisis de estabilidad en condición estática.	145
Tabla 5.7 Resumen de resultados de los análisis de estabilidad en condiciones pseudoestática, con filtración y pseudoestática con filtración.	146
Tabla 5.8 Matriz de condiciones de estabilidad para sistemas de cobertura con geomembrana (GM) y revestimiento geosintético de arcilla (GCL).	152
Tabla 5.9 Parámetros estadísticos de las variables de diseño consideradas en el MSMC.	155
Tabla 5.10 Ángulos de fricción mínimos necesarios para índices de confiabilidad específicos en coberturas sin reforzamiento.	158
Tabla 5.11 Ángulos de fricción mínimos necesarios para índices de confiabilidad específicos en coberturas reforzadas con geomallas.	160
Tabla 5.12 Ángulos de fricción mínimos necesarios para índices de confiabilidad específicos en coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas.	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Etapas de formación del drenaje ácido de mina. Fuente: Pozo-Antonio <i>et al.</i> , 2017.....	30
Figura 2.2 Espejo de aguas ácidas en la parte baja del depósito de relaves Quiulacocha en Cerro de Pasco, Perú. Fuente: Ledesma, 2018.....	31
Figura 2.3 Superficie de geomembrana texturada por coextrusión. Fuente: Scheirs, 2009.....	35
Figura 2.4 Esquema conceptual de soldaduras por extrusión y termofusión. Fuente: Touze-Foltz <i>et al.</i> , 2008.	36
Figura 2.5 Configuraciones de GCL: (a) GCL con adhesivo; (b) GCL cosido; (c) GCL punzonado; (d) GCL con GM unida con adhesivo. Fuente: Kong <i>et al.</i> 2017.	40
Figura 2.6 Comportamiento esfuerzo de tensión vs. deformación axial en materiales geosintéticos. Fuente: Chen y Bin Zhu, 2009.	42
Figura 2.7 Geomallas (a-i) extruida-unidireccional, (a-ii) extruida-bidireccional, (b) soldada y (c) tejida. Fuente: Shukla y Yin, 2006.	43
Figura 2.8 Mecanismos de interacción suelo - geomalla. Sección A-A: fricción entre superficies. Sección B-B: enclavamiento de partículas. Adaptado de: Moraci <i>et al.</i> , 2014.....	44
Figura 2.9 (a) Envolvente de esfuerzo de corte vs. desplazamiento para diferentes esfuerzos normales; (b) Envolvente lineal de las resistencias cortante pico (τ_p) y residual o post-pico (τ_r), en función al esfuerzo normal.	46
Figura 2.10 Caracterización de una envolvente no lineal de resistencia cortante vs. esfuerzo normal. Fuente: Fox y Stark, 2015.....	46
Figura 2.11 Equipo de corte directo para interfases propuesto por Stoewhase. P: Presión de aire; N: fuerza de soporte vertical; T: fuerza de corte; s: desplazamiento; V: medidor de control de volumen. Fuente: Stoewhase <i>et al.</i> , 2002.	48
Figura 2.12 Comparación entre enfoques de diseño determinístico y probabilístico. Fuente: Sia, 2007.....	54
Figura 2.13 (a) Margen de seguridad representativo del diseño; (b) límite de falla, región segura y región de falla. Fuente: Sia, 2007.....	55
Figura 2.14 Distribución de probabilidad de la función de desempeño representada por FS y representación del rango de “falla” donde la función de estado límite es FS=1,0. Fuente: Sia, 2007.	58

Figura 2.15 Probabilidad de falla en función del índice de confiabilidad para una distribución de probabilidad normal.....	60
Figura 3.1 Configuración conceptual y balance hídrico de un sistema de cobertura. Adaptado de: Aubertin <i>et al.</i> (2016).	62
Figura 3.2 Flujo de agua en la capa de drenaje. Fuente: Giroud <i>et al.</i> , 1995. ...	70
Figura 3.3 Mapa de probabilidad de ocurrencias de lluvias en el Perú. Fuente: SENAMHI, 2017.	70
Figura 3.4 Perfil hidráulico en una capa de drenaje en función del parámetro adimensional λ : (a) $\lambda > 0,25$; (b) $\lambda \leq 0,25$ (c) $\lambda \approx 0$. Adaptado de: Giroud <i>et al.</i> , 2004	72
Figura 3.5 Modelo conceptual del método límite para esfuerzos de tensión y de corte en el geosintético. Adaptado de: Koerner y Hwu, 1991.....	80
Figura 3.6 (a) Diagrama de fuerzas en la cobertura; (b) modelo conceptual de columna compuesta simple. Adaptado de: Liu, 2001.	81
Figura 3.7 Cargas y deformaciones axiales en el modelo de columna compuesta simple con zonas en tensión y compresión.....	82
Figura 3.8 (a) Sistema de cobertura con geomembrana; (b) Interfases con geosintéticos en el sistema de cobertura Tipo I.	86
Figura 3.9 (a) Sistema de cobertura con GCL; (b) Interfases con geosintéticos en el sistema de cobertura Tipo II.....	87
Figura 3.10 (a) Sistema de cobertura con GM y GCL; (b) Interfases con geosintéticos en el sistema de cobertura Tipo III.	88
Figura 4.1 Muestras de suelos granulares	95
Figura 4.2 Muestras de suelos de baja permeabilidad	95
Figura 4.3 Muestra de geomembrana de LLDPE de 1,5 mm de espesor (lado texturado).	97
Figura 4.4 Muestra de GCL compuesto por geotextiles tejido y no tejido.....	98
Figura 4.5 Equipo para ensayos de corte directo a gran escala con geosintéticos Fuente: Laboratorio Geotécnico de Anddes.....	102
Figura 4.6 Envoltantes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfases GM-SG	105
Figura 4.7 Contraste de envoltantes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico de los resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfases GM-SG	105

Figura 4.8 Envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfases GM-SBP.....	107
Figura 4.9 Contraste de envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y residual (b) de resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfases GM-SBP	107
Figura 4.10 Envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfases GCL-SG.	108
Figura 4.11 Contraste de envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y residual (b) de resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfases GCL-SG.	109
Figura 4.12 Envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfases GM-GCL.....	110
Figura 4.13 Contraste de envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y residual (b) de resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfases GM-GCL.....	110
Figura 4.14 Contraste de envoltentes promedio de esfuerzo normal vs. resistencia cortante en condiciones pico (a) y residual (b) en las interfases analizadas.	111
Figura 4.15 (a) Relación τ_r/τ_p obtenidas en los ensayos de corte directo; (b) Relación τ_r/τ_p promedio por tipo de interfase.	112
Figura 4.16 Contraste de la resistencia cortante en interfases del sistema de cobertura Tipo I para esfuerzos normales de: (a) 10 kPa y (b) 30 kPa.....	113
Figura 4.17 Contraste de la resistencia cortante en interfases del sistema de cobertura Tipo II para esfuerzos normales de (a) 10 kPa y (b) 30 kPa.....	114
Figura 4.18 Contraste de la resistencia cortante en interfases del sistema de cobertura Tipo III para esfuerzos normales de: (a) 10 kPa y (b) 30 kPa.....	115
Figura 5.1 (a) Diagrama de cuerpo libre del sistema de cobertura con ancho variable; (b) cuña pasiva; (c) cuña activa.....	117
Figura 5.2 Modelo de columna compuesta con distribución de cargas axiales.	117
Figura 5.3 Etapas del análisis basado en la teoría de confiabilidad.....	125
Figura 5.4 Diagrama de flujo del método de simulación de Monte Carlo aplicado a la evaluación del factor de seguridad.....	127
Figura 5.5 Influencia del coeficiente sísmico en el valor de FS	129
Figura 5.6 Influencia de la carga hidráulica en el valor de FS	129

Figura 5.7 Influencia de la adhesión aparente de la interfase en el valor de FS	130
Figura 5.8 Influencia del ángulo de fricción de la interfase en el valor de FS ..	130
Figura 5.9 Influencia del peso específico del suelo en el valor de FS	131
Figura 5.10 Influencia del ángulo de fricción del suelo en el valor de FS	131
Figura 5.11 Influencia del espesor de la cobertura en FS dependiendo de la adhesión aparente en la interfase.	132
Figura 5.12 Influencia de la altura del talud (H) en FS considerando espesores diferentes (h_c).	133
Figura 5.13 Influencia de la relación entre la longitud (L) y espesor de la cobertura (h_c) en FS	133
Figura 5.14 Influencia de la tensión de reforzamiento en FS , considerando taludes con alturas diferentes.	134
Figura 5.15 Tensión de reforzamiento necesaria para un $FS=1.5$ en alturas e inclinaciones de talud diferentes.	134
Figura 5.16 Influencia de la tensión de reforzamiento en FS considerando diferentes alturas de talud.....	136
Figura 5.17 Tensión de reforzamiento necesaria para un $FS = 1.5$ considerando diferentes alturas de talud.....	136
Figura 5.18 Influencia de la relación KC/KT en el FS considerando alturas de talud diferentes.....	136
Figura 5.19 Influencia de la relación KC/KT en las longitudes en tensión y compresión.	136
Figura 5.20 Comparación entre la tensión de trabajo y la tensión última al 5 % de deformación.....	137
Figura 5.21 Comparación entre la tensión de trabajo y la tensión última al 10 % de deformación.....	137
Figura 5.22 Escenarios considerados en el análisis de estabilidad de los sistemas de cobertura.	138
Figura 5.23 Función de densidad del FS obtenida de simulaciones realizadas en el presente estudio.	157
Figura 5.24 Función de probabilidad del FS obtenida de simulaciones realizadas en el presente estudio.	157
Figura 5.25 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas sin reforzamiento en condiciones de servicio (a) con sismo y (b) filtración.....	157

Figura 5.26 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas reforzadas con geomallas en condiciones de servicio (a) con sismo y (b) filtración.....	159
Figura 5.27 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas en condición de servicio con sismo, para (a) H=10 m y (b) H=30 m.....	160
Figura 5.28 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas en condición de servicio con filtración, para (a) H=10 m y (b) H=30 m.	161

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- ASTM : Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (*American Society for Testing and Materials*).
- DAM : Drenaje ácido de mina.
- GCL : Geocompuesto de bentonita (*geosynthetic clay liner*).
- GM : Geomembrana.
- GRI : Instituto de investigación en geosintéticos (*Geosynthetic Research Institute*).
- HDPE : Polietileno de alta densidad (*high density polyethylene*).
- IP : Índice de plasticidad.
- LL : Límite líquido.
- LLDPE : Polietileno lineal de baja densidad (*linear low density polyethylene*).
- MHA : Máxima aceleración horizontal (*maximum horizontal acceleration*).
- MEM : Ministerio de Energía y Minas.
- PSR : Relación de sumersión paralela (*parallel submergence ratio*).
- PGA : Aceleración pico del suelo (*peak ground acceleration*).
- EPA : Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*).
- PAG : Potencial generador de drenaje ácido.
- RBD : Diseño por confiabilidad (*reliability-based design*).
- SUCS : Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- α : Adhesión de la interfase (KPa).
- C_α : Resistencia debido a la adhesión de la interfase en la cuña activa (N/m).
- c_p : Cohesión del suelo en la cobertura (KPa).
- C_p : Resistencia debido a la cohesión del suelo en la cuña pasiva (N/m).
- C : Carga de compresión axial en el suelo por unidad de ancho (N/m).
- E : Módulo de elasticidad del suelo en la cobertura (kPa).
- E_A, E_P : Fuerzas de empuje entre las cuñas activa y pasiva (N/m).
- f : Fuerza de corte aplicada por unidad de ancho (kPa).
- f_s : Fuerza de corte en la interfase crítica por unidad de ancho (kPa).
- f_n : Fuerza de corte neta aplicada sobre la interfase crítica (kPa).
- FS : Factor de seguridad del sistema de cobertura.
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).
- h : Espesor de la cobertura de suelo (m).

- h_w : Altura de la superficie de agua libre medida en dirección perpendicular al talud (m).
- H : Altura vertical del talud medido desde el pie (m).
- H_w : Altura vertical de la superficie de agua libre medida desde el pie (m).
- H_c : Altura vertical de la cobertura de suelo entre cuñas (m).
- k : Conductividad hidráulica, en cm/s.
- k_h, k_v : Coeficientes sísmicos horizontal y vertical.
- K_{Ti} : Rigidez a la tensión del i -ésimo componente en la columna compuesta (N/m).
- K_T, K_C : Rigideces a la tensión y compresión (N/m).
- L : Longitud de la cobertura de suelo sobre la geomembrana (m).
- L_T, L_C : Longitud de la columna compuesta en tensión o compresión (m).
- N_A, N_P : Fuerza efectiva normal al plano de falla de la cuña activa o pasiva (N/m).
- P_f : Probabilidad de falla.
- T_{gs} : Fuerza de tensión en el geosintético (N/m).
- U_h : Presión de poros entre la cuña pasiva y la cuña activa (kN/m).
- U_n : Presión de poros perpendicular al talud sobre la cuña activa (kN/m).
- U_v : Presión de poros vertical sobre la cuña pasiva (kN/m).
- W : Peso total de la cobertura de suelo (N/m).
- W_P, W_A : Pesos de las cuñas pasiva y activa (N/m).
- V : Coeficiente de variación (%).
- β_i : Ángulo del talud de la cobertura de suelo ($^\circ$).
- γ_d, γ_{sat} : Pesos unitarios no saturado y saturado de la cobertura de suelo (N/m³).
- γ_w : Peso unitario del agua (N/m³).
- δ : Ángulo de fricción de la interfase ($^\circ$).
- β : Ángulo del talud de la cobertura de suelo ($^\circ$).
- ω : Ángulo de la cobertura de suelo ($^\circ$).
- φ : Ángulo de fricción de la cobertura de suelo ($^\circ$).
- σ_n : Esfuerzo normal (kN/m²).
- $\tau_{p,r}$: Resistencia cortante pico o residual de la interfase (kN/m²).
- μ, σ : Valor promedio y desviación estándar del conjunto de datos.
- μ_{FS}, σ_{FS} : Valor promedio y desviación estándar del factor de seguridad.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Los impactos ambientales generados por la actividad minera han motivado en los últimos años una mayor regulación y fiscalización en el proceso de cierre de proyectos mineros y en el manejo de pasivos ambientales. En el caso de unidades mineras nuevas o en operación, de acuerdo con la normatividad vigente, los titulares mineros tienen la obligación de planificar y ejecutar actividades de cierre que permitan rehabilitar las áreas afectadas, así como prevenir y mitigar impactos negativos en el medio ambiente. En el caso de minas huérfanas o abandonadas, el Ministerio de Energía y Minas ha elaborado un inventario de pasivos ambientales, de los cuales en algunos casos el estado se viene encargado de las obras de remediación ambiental.

En este contexto, una de las actividades más importantes que se realiza es el cierre de depósitos de residuos mineros, los cuales usualmente contienen millones de metros cúbicos de materiales como relaves, desmonte o mineral lixiviado. Estos residuos mineros, por lo general, contienen sustancias que al estar en contacto con el oxígeno y el agua se oxidan y generan flujos de drenaje ácido con concentración de metales pesados, por lo cual representan un riesgo potencial para el ecosistema y para la seguridad y salud de la población. El principal propósito de realizar el cierre de depósitos de residuos es garantizar la estabilidad química del material generador de drenaje ácido y, por consiguiente, prevenir impactos negativos en el medio ambiente que pueden ser irreversibles.

El cierre de depósitos de residuos se realiza colocando un sistema de cobertura cuya configuración típica incluye capas de suelo de material orgánico, material de drenaje y material de baja permeabilidad. La instalación de esta última capa permite formar una barrera hidráulica que disminuye la infiltración de agua y por consiguiente también evita la generación de drenaje ácido (Wilson *et al.*, 2007). No obstante, se han reportado casos donde la permeabilidad de esta capa se incrementa a largo plazo originando que la infiltración de agua sea mayor a la deseada (Wilson *et al.*, 2003; Taylor *et al.*, 2003), ya sea por deficiencias en la preparación y colocación del material o producto de la erosión del suelo. Asimismo, esta configuración típica puede resultar inaplicable y muy costosa

cuando las canteras de suelo de baja permeabilidad han sido agotadas durante la etapa de operación o se encuentran en zonas muy alejadas.

Debido a las limitaciones que presentan las coberturas de cierre tradicionales, el uso de geosintéticos (p. ej., geomembrana o GCL) se ha incrementado en los últimos años ya sea como complemento o reemplazo del suelo de baja permeabilidad (p. ej., Lewis y Gallinger, 1999; Foye, 2011). De esta forma, los depósitos de residuos mineros son encapsulados con sistemas de cobertura que cuentan con un revestimiento impermeable y de mayor durabilidad. No obstante, el uso de geosintéticos también puede generar problemas en la estabilidad física de la cobertura de suelo, siendo susceptible a diversos factores como la inclinación del talud, la carga hidráulica o la fuerza sísmica. Debido a ello, en algunos casos también se considera el uso de geosintéticos de reforzamiento o drenaje (p. ej., geomallas, geoceldas, geocompuestos de drenaje).

La estabilidad física de sistemas de cobertura puede ser evaluada considerando múltiples enfoques y criterios. En los últimos años, varios autores propusieron métodos analíticos para evaluar la estabilidad física basados en el análisis de equilibrio límite y, en algunos casos, en la formulación de una columna compuesta simple (p. ej., Hadj Hamou y Kavazanjian, 1985; Koerner y Soong, 2005; Giroud *et al.*, 1995a y 1995b; Zhang *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2016; Koshand *et al.*, 2018). No obstante, este enfoque de diseño determinístico viene siendo reemplazado por el enfoque de diseño por confiabilidad (RBD, por sus siglas en inglés) que permite analizar cuantitativamente la variabilidad e incertidumbre de los parámetros de diseño (Sia y Dixon, 2008).

1.2 PROBLEMÁTICA

En sistemas de cobertura con geosintéticos, la superficie de falla potencial en donde puede originarse el deslizamiento de la cobertura es precisamente la interfase entre el suelo y el geosintético. El deslizamiento de la cobertura no solo afecta su funcionalidad sino también incrementa los costos de reparación y mantenimiento. Este aspecto constituye la principal desventaja de los sistemas de cobertura con geosintéticos, a pesar de que con su uso adecuado se garantiza que el material generador de drenaje ácido no sea afectado por la infiltración de agua.

Desde el punto de vista geotécnico y ambiental, la estabilidad física del sistema de cobertura es un aspecto fundamental que debe garantizarse a lo largo de su vida útil. Por lo tanto, su diseño debe considerar los principales factores que afectan la estabilidad física, tales como la fuerza sísmica y el flujo de agua en la capa de drenaje. Estos aspectos son relevantes en nuestro país por ser una de las regiones con mayor actividad sísmica a nivel mundial y por la ocurrencia de precipitaciones de variada intensidad a lo largo de su territorio.

En el Perú, una de las dificultades que enfrenta el estado del arte en el diseño de sistemas de cobertura con geosintéticos es la falta de normas o reglamentos que establezcan criterios mínimos de diseño y medidas de reforzamiento aplicables orientadas a garantizar su estabilidad física. La “Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros”, presentada por el Ministerio de Energía y Minas, tampoco brinda información con respecto a ello. Estos aspectos constituyen un factor limitante para los profesionales involucrados en el desarrollo y revisión de la ingeniería en proyectos de cierre de minas.

En este contexto, es necesario definir condiciones para la estabilidad física de sistemas de cobertura con geosintéticos, con las cuales se cumplan los factores de seguridad aceptables, considerando condiciones de servicio que incluyan el efecto de la fuerza sísmica y el flujo de agua en la capa de drenaje. Este aspecto es relevante porque a través de estas condiciones de estabilidad se podrían evaluar distintas alternativas que permitan garantizar la funcionalidad y durabilidad de la cobertura de cierre a lo largo de su vida útil, tales como el reforzamiento con geomallas, la reducción de la inclinación del talud, cambios en la geometría o en la configuración de la cobertura, entre otros.

Para tal fin, es necesario realizar un análisis paramétrico de la estabilidad física de la cobertura, considerando múltiples escenarios y condiciones de servicio; evaluar el reforzamiento necesario con el uso de geomallas en aquellos escenarios donde no se cumplan los factores de seguridad requeridos; y formular ábacos de diseño asociados a índices de confiabilidad que permitan un análisis preliminar y rápido de la estabilidad física. Asimismo, es necesario estimar la resistencia cortante de la interfase suelo - geosintético en los sistemas de cobertura por ser la principal superficie de falla.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Proponer criterios y herramientas gráficas aplicables en el diseño y análisis de estabilidad de sistemas de cobertura con geosintéticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estimar la resistencia cortante de la interfase crítica de deslizamiento en sistemas de cobertura con geomembranas o geocompuestos de bentonita (GCL).
- Realizar un análisis paramétrico de la estabilidad física en sistemas de cobertura con geosintéticos; incluyendo el reforzamiento con geomallas en aquellos escenarios donde no se cumplan los factores de seguridad requeridos.
- Desarrollar una matriz de condiciones de estabilidad y ábacos con índices de confiabilidad para cada tipo de sistema de cobertura analizado.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 CIERRE DE MINAS

La actividad minera inevitablemente genera una serie de impactos en el medio físico en el que se desarrolla y, consecuentemente, impacta la salud y seguridad de la flora, fauna y población cercana. Los impactos en el medio físico se observan principalmente en las condiciones superficiales y subterráneas del suelo y fuentes de agua, pueden ser temporales o permanentes, pasivos o activos, y con un alcance regional o localizado. Debido a ello, en los últimos años ha surgido un interés creciente del estado, la industria, la academia y la sociedad en el manejo de los impactos generados por la actividad minera, lo cual se refleja en la tendencia hacia una mayor fiscalización y regulación en el proceso de cierre de proyectos mineros.

En este contexto, el cierre de minas es un proceso que comprende un conjunto de actividades efectuadas por las empresas mineras antes, durante y después del cese de sus operaciones, con el propósito de rehabilitar las áreas afectadas por la actividad minera, así como prevenir, mitigar y controlar los impactos ambientales y sociales producto de esta actividad, en cumplimiento con la normatividad vigente.

2.1.1 Antecedentes

A nivel mundial, la industria minera comenzó a abordar con mayor rigor el cierre de minas a partir de la década de 1970 debido a una mayor regulación de los gobiernos y un mayor conocimiento público de problemas ambientales relacionados con la minería (Worrall, Neil, Brereton y Mulligan, 2009). La creación del *International Council on Mining and Metals (ICMM)*, conformada por las principales compañías e instituciones mineras nacionales e internacionales de todo el mundo, ha sido una de las principales medidas de la propia industria en alinear sus actividades hacia un desarrollo sostenible. A partir de su creación, surgieron una serie de iniciativas y estándares mundiales tales como *The Extractive Industries Transparency Initiative (EITI)*, *Initiative for Responsible Mining Assurance (IRMA)*, *Global Reporting Initiative - Mining and Metals Sector Supplement (GRI-MMSS)*, entre otros (Hojem, 2014).

En este contexto, países como Australia, Argentina, Canadá, Chile, Colombia, México, Estados Unidos y Ecuador también han establecido un marco normativo que regula el cierre de minas. En la mayoría de los países, los proyectos mineros nuevos y existentes tienen la obligación de cumplir una serie de exigencias ambientales fijadas a través de normas, políticas públicas e instituciones gubernamentales (Mudd, 2007). Asimismo, se han establecido garantías financieras o creado fondos para garantizar que las actividades de rehabilitación sean llevadas a cabo.

El conjunto de iniciativas técnicas, legales y financieras implementadas en todo el mundo ha permitido que el proceso de cierre se planifique desde el inicio de un proyecto minero. No obstante, si bien es cierto que estas iniciativas han permitido avances en el cierre de minas de proyectos nuevos o en operación, su implementación es reciente considerando que la actividad minera ha venido desarrollándose desde hace siglos.

2.1.2 Normatividad

En el 2003, se promulgó la Ley N° 28090 “Ley que regula el cierre de minas” así como su respectivo reglamento. En dicha norma se establece que cada titular minero es responsable del cierre de las áreas, labores e instalaciones que comprende su actividad. Asimismo, se faculta al Ministerio de Energía y Minas el control y fiscalización de las obligaciones asumidas por los titulares mineros para la rehabilitación de las áreas afectadas.

La ley N° 28090 es aplicable a unidades mineras nuevas y unidades mineras en operación. Dicha norma establece que los titulares mineros tienen la obligación de presentar un plan de cierre desde el inicio de sus actividades y constituir una garantía financiera que permita cubrir los costos de las medidas de rehabilitación.

2.1.3 Plan de cierre de minas

El plan de cierre es un instrumento de gestión ambiental que comprende un conjunto de actividades que serán implementadas por los titulares mineros en la rehabilitación de las áreas afectadas. Asimismo, incluye escenarios de cierres progresivo, temporal y final, así como actividades post cierre.

En proyectos mineros nuevos, el plan de cierre es presentado a nivel conceptual como parte del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y presentado a nivel de factibilidad antes del inicio de la etapa de operación. Posteriormente a su aprobación, el plan de cierre es actualizado periódicamente. La actualización final del plan de cierre es presentada antes del cierre definitivo de las operaciones mineras e incluye el detalle de las actividades definitivas que serán implementadas, así como las condiciones de monitoreo y mantenimiento necesarias en la etapa de post cierre.

Las actividades de cierre son implementadas progresivamente a lo largo del ciclo de vida de la mina y son específicas para cada componente minero. El propósito es minimizar y evitar impactos ambientales negativos en el ecosistema y permitir que las áreas afectadas alcancen condiciones medioambientales que sean adecuadas para su uso y desarrollo sostenible. Las actividades de cierre más importantes que involucran la estabilización, recuperación y conservación de las condiciones medioambientales son:

- Estabilización física de pilas y botaderos de lixiviación, depósitos de relaves, depósitos de desmonte, instalaciones de manejo de aguas, áreas de materiales de préstamo, entre otros.
- Estabilización geoquímica de residuos de mina y paredes de tajo abierto mediante el tratamiento o prevención del drenaje ácido y lixiviación de metales.
- Estabilización hidrológica de cada componente para el manejo del drenaje y protección contra la erosión.
- Rehabilitación de la forma del terreno para su uso después del cierre.
- Revegetación de la superficie de componentes mineros.
- Rehabilitación de hábitats terrestres y acuáticos.

2.2 PASIVOS AMBIENTALES

Históricamente, el abandono de una mina luego de culminar el proceso de extracción era una práctica común y el manejo de aspectos ambientales tenía muy poca prioridad. Debido a ello, los cierres de mina que se realizaron antes de las regulaciones actuales no han tenido la fiscalización ni control adecuados y presentan distintos tipos de pasivos ambientales como instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos.

En todo el mundo existen minas abandonadas o huérfanas provenientes de la actividad minera desarrollada desde hace siglos y cuyos responsables en muchos casos no han sido identificados. En la mayoría de los casos, aún no se ha realizado la rehabilitación de las áreas afectadas, ni la mitigación, remediación y compensación de los impactos generados.

En la Tabla 2.1 se indica la cantidad estimada de sitios mineros huérfanos o abandonados en algunos de los países con mayor producción minera en el mundo. Worrall *et al.* (2009) estiman que a nivel mundial existen millones de sitios mineros en esta situación.

Tabla 2.1 Cantidad estimada de sitios mineros huérfanos o abandonados.

País	Cantidad estimada
USA	560 000
Australia	32 000
UK	11 700
Canadá	10 100
Sudáfrica	8000
Japón	5500
México	2368
Suecia	1000
Perú	850
Chile	492

Fuente: Worrall *et al.*, 2009; Aramburo y Olaya, 2011.

2.2.1 Manejo de pasivos ambientales

Cuando los impactos generados por la actividad minera representan un riesgo para la salud y seguridad de la población y del medio ambiente surge la necesidad y obligación de su manejo, lo cual es asumido por el estado o por quien haya sido identificado como responsable. En países como Chile, Colombia, Perú y Bolivia esta obligación ambiental se conoce como Pasivo Ambiental Minero (PAM), mientras que en EEUU y Canadá, el manejo de los daños ocasionados por la actividad minera se fundamenta en el principio de “*environmental liability*”, a través del cual se obliga a los responsables a realizar la remediación o reembolsar los gastos al estado en el caso de que éste la realice (Aramburo y Olaya, 2012). En general, la tendencia observada en la gestión y manejo de pasivos ambientales a nivel internacional se ha enfocado principalmente en los siguientes aspectos:

- Identificar los pasivos ambientales originados por la actividad minera y a sus respectivos responsables.

- Constituir fuentes de financiamiento para la remediación, mitigación y compensación de los impactos ambientales generados.
- Establecer metodologías e instrumentos técnicos, legales y financieros para su gestión y manejo.
- Facultar a instituciones del estado para la identificación, evaluación y, de ser necesario, la remediación de las áreas afectadas.

La gestión y manejo de pasivos ambientales en el Perú es parte de una política de estado y está regulada por la Ley N° 28271, promulgada el 2004, y su respectivo reglamento. De acuerdo con los lineamientos establecidos en la normatividad vigente, el MEM ha elaborado un inventario de pasivos ambientales a nivel nacional y, en aquellos pasivos clasificados como de alto riesgo, el MEM asumió la elaboración de los estudios de ingeniería y la ejecución de las obras de remediación.

2.2.2 Inventario de pasivos ambientales en Perú

De acuerdo con la Dirección General de Minería del MEM, se han identificado alrededor de 8488 pasivos ambientales hasta el año 2019, de los cuales 2699 son residuos mineros como desmontes de mina, relaves y pilas de lixiviación. Estos residuos mineros se encuentran en 52 cuencas hidrográficas del país, distribuidos en 18 regiones, principalmente en: Áncash (17,3 %), Cajamarca (16,5 %), Puno (12,7 %), Lima (9,5 %) y Huancavelica (9,2 %), tal como se indica en la Tabla 2.2. Hasta el año 2018, en el Perú aún no se han gestionado las obras de remediación en aproximadamente el 80 % del total de residuos mineros identificados.

Tabla 2.2 Residuos mineros identificados como pasivos ambientales en minas abandonadas o huérfanas en Perú.

Región	Cantidad de residuos mineros identificados como pasivos ambientales					Con responsables identificados		Con estudios ambientales gestionados		
	Desmonte de mina	Relave	Pilas de lixiviación	Otros (*)	Total		Und	%	Und	%
					Und	(%)				
Ancash	412	30	-	25	467	17,3	36	1,3	18	0,7
Apurímac	26	13	-	4	43	1,6	-	-	-	-
Arequipa	72	16	-	-	88	3,3	22	0,8	21	0,8
Ayacucho	13	11	-	-	24	0,9	7	0,3	7	0,3
Cajamarca	411	24	2	9	446	16,5	365	13,5	341	12,6
Cusco	69	13	-	2	84	3,1	-	-	-	-
Huancavelica	240	9	-	-	249	9,2	108	4,0	99	3,7
Huánuco	73	1	-	4	78	2,9	-	-	-	-
Ica	5	21	-	-	26	1,0	3	0,1	-	-

Región	Cantidad de residuos mineros identificados como pasivos ambientales					Con responsables identificados		Con estudios ambientales gestionados		
	Desmonte de mina	Relave	Pilas de lixiviación	Otros (*)	Total		Und	%	Und	%
					Und	(%)				
Junín	133	24	-	45	202	7,5	18	0,7	12	0,4
La libertad	94	26	-	15	135	5,0	6	0,2	6	0,2
Lambayeque	1	-	-	-	1	0,0	-	-	-	-
Lima	207	38	1	11	257	9,5	70	2,6	34	1,3
Moquegua	16	8	-	4	28	1,0	4	0,1	4	0,1
Pasco	109	54	-	8	171	6,3	7	0,3	1	0,0
Piura	1	9	-	-	10	0,4	-	-	-	-
Puno	304	32	2	6	344	12,7	96	3,6	50	1,9
Tacna	39	6	-	1	46	1,7	11	0,4	-	-
Total	2225	335	5	134	2699	100,0	753	27,9	593	22,0

(*) Escorias, lodos de neutralización, material de desbroce, residuos de carbón y no identificados.

Fuente: Reporte Anual de la DGM-MEM, 2019.

2.3 DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)

Uno de los impactos principales generados en la minería es la contaminación originada por el drenaje ácido de mina (DAM) que se genera a partir de la oxidación de sulfuros metálicos en presencia de oxígeno y agua (Chaparro, 2015). Los minerales responsables de la generación de drenaje ácido principalmente son los sulfuros de hierro, tales como la piritita y pirrotita y, en menor medida, minerales como la calcopiritita, marcasita, esfalerita, entre otros (Morin & Hutt, 1997). Estos materiales provienen de labores mineras y procesos de concentración de minerales y se encuentran en grandes volúmenes en paredes de tajo abierto, depósitos de desmonte, depósitos de relaves, pilas de material lixiviado y otras fuentes que se indican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Fuentes de generación de drenaje ácido de mina.

Fuentes primarias	Fuentes secundarias
○ Depósito de desmonte de mina	○ Lodos de tratamiento de aguas
○ Depósitos de relaves	○ Cortes en superficies de roca
○ Labores mineras subterráneas y a tajo abierto.	○ <i>Load-out</i> concentrado
○ Agua subterránea descargada de forma natural o bombeada	○ <i>Stockpiles</i>
○ Filtraciones en la superficie de áreas rehabilitadas	○ Derrames de concentrados
○ Roca de construcción usada en carreteras, presas, entre otras fuentes.	○ Embalses de emergencia

Fuente: Akcil y Koldas, 2006.

2.3.1 Mecanismo de formación del DAM

La generación de drenaje ácido es el resultado de una serie de reacciones químicas interrelacionadas que se desarrollan a través de mecanismos de oxidación directos e indirectos. El mecanismo de oxidación directo consiste en la reacción del oxígeno con los minerales sulfurosos y se desarrolla lentamente en las primeras etapas de formación del drenaje ácido. Al incrementarse la presencia de iones ferrosos y alcanzar niveles de pH bajos, el mecanismo de oxidación indirecto se acelera por la acción de bacterias quimiolitótrofas acidófilas y neutrófilas que son las responsables de la mayor parte del DAM generado (Pozo-Antonio, Puente, Laguela y Veiga, 2017).

Las etapas de formación del DAM se describen en el esquema mostrado en la Figura 2.1. Una de las características más importantes del drenaje ácido radica en que, una vez que se genera, el proceso de formación es cíclico e irreversible y perdura por años mientras no se elimine de los agentes que lo originan (Chaparro, 2015).

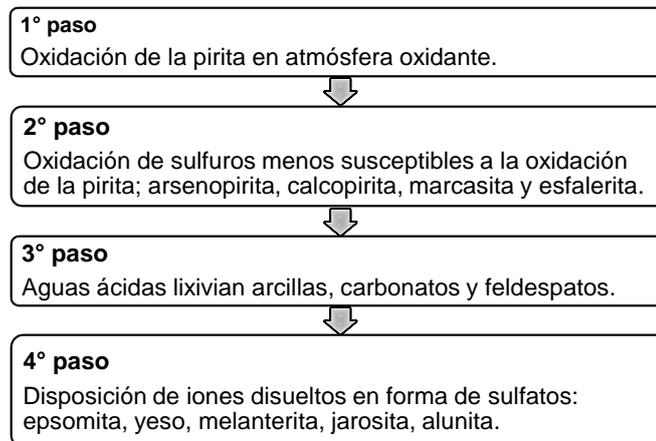


Figura 2.1 Etapas de formación del drenaje ácido de mina. Fuente: Pozo-Antonio *et al.*, 2017.

2.3.2 Efectos del DAM en el medio ambiente

El drenaje ácido no solo es altamente contaminante por su bajo pH sino también por la concentración alta de sulfatos y metales pesados disueltos como: Pb, Hg, Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Cd y Ni (Aduvire, 2006). El transporte de estas sustancias tóxicas se da lugar a través las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, ello no solo disminuye la calidad de los recursos hídricos sino también restringe su posible uso. Asimismo, las partículas en suspensión cubren la superficie del suelo y el fondo de los ríos y pueden distinguirse por una coloración rojiza característica

de los precipitados del hierro, por consiguiente, se produce la degradación del ecosistema existente y se generan problemas en la salud y seguridad de los seres vivos, tales como: inhibición del crecimiento de cultivos y vegetación silvestre; disminución de la flora y fauna acuática en ríos y lagos; incremento de muertes y distintos tipos de enfermedades en los animales y la población de la zona, entre otros efectos. El manejo del drenaje ácido puede resultar una tarea muy compleja después del cierre de la mina, más aún cuando ya no se cuenta con el personal y los recursos de la unidad minera responsable que permitan implementar las medidas adecuadas para su manejo.

Uno de los casos más emblemáticos en Perú donde se evidencia el impacto del drenaje ácido en el medio ambiente es la contaminación generada por el depósito de relaves Quiulacocha. Este pasivo ambiental contiene alrededor de 200 millones de toneladas de residuos mineros y ha originado la desaparición de especies típicas de la zona, la modificación sustancial del paisaje y el incremento en la concentración de metales pesados (Pb, Cu, Zn y otros) en las fuentes de agua existentes (Ledesma, 2018), tal como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Espejo de aguas ácidas en la parte baja del depósito de relaves Quiulacocha en Cerro de Pasco, Perú. Fuente: Ledesma, 2018.

2.4 COMPONENTES MINEROS CON MATERIAL GENERADOR DE DAM

Durante el procesamiento del mineral se generan una serie de residuos como relaves, material lixiviado y desmonte de mina, los cuales son almacenados en depósitos de gran volumen. Estos componentes mineros pueden convertirse en una fuente de generación de drenaje ácido dependiendo de su composición y las

condiciones medioambientales del lugar en el que se ubican. A continuación, se describen el origen y las características principales de estos componentes.

2.4.1 Depósitos de relave

El relave es un subproducto del proceso de concentración de minerales compuesto por una mezcla de roca molida y agua. Los relaves tienen una concentración baja de minerales con valor económico y distintos tipos de compuestos químicos generados por el uso de reactivos para la obtención del concentrado. Debido a su naturaleza, los relaves son materiales que difieren considerablemente de los suelos naturales en cuanto a sus propiedades índice (p. ej., gravedad específica mayor a 3.0) y susceptibilidad a la lixiviación y drenaje ácido o alcalino (Beltrán-Rodríguez *et al.*, 2018; Dold, 2014).

Al finalizar el proceso de concentración, el relave sale de la planta en forma de pulpa con un 20 a 35 % de concentración de sólidos. Posteriormente, se recupera el agua y se incrementa su consistencia mediante métodos de espesamiento o filtración. En función al porcentaje de sólidos, los relaves pueden clasificarse como relaves en pulpa (30-65 %), relaves espesados (65-75 %), relaves en pasta (75-85 %) y relaves filtrados (>85 %). El espesado o filtrado de los relaves se realiza con el propósito de obtener un contenido de agua óptimo para su disposición.

El relave generado (a excepción del relave filtrado) es trasladado mediante tuberías hacia un depósito retenido por un dique de contención ubicado en una quebrada o valle. Los depósitos de relave pueden tener una altura mayor a 100 m y almacenar millones de metros cúbicos de este material. El dique puede estar conformado por relleno estructural o por el propio relave y tiene una inclinación de talud aguas abajo entre 1,5H:1V a 3,5H:1V, dependiendo de las características del relave y el método de disposición.

Los problemas en la estabilidad física o química de los depósitos de relaves pueden generar grandes impactos sociales y ambientales por el gran volumen de material que almacenan y por las características propias del relave. Debido a ello, su diseño también considera obras complementarias de reforzamiento, drenaje e instrumentación. En algunos casos, es necesario incluir un revestimiento impermeable en la cara aguas arriba de la presa de contención para evitar

filtraciones provenientes del embalse o un revestimiento en la base del depósito para evitar la filtración de sustancias tóxicas hacia fuentes de agua subterránea.

2.4.2 Depósitos de desmonte de mina

El desmonte de mina, también llamado mineral de baja ley, es el material rocoso generado en la excavación realizada para acceder al mineral con valor económico. Este material generalmente es colocado al volteo en depósitos de gran extensión y volumen. La cantidad de desmonte generado en minas a cielo abierto es mucho mayor en comparación a las minas subterráneas, lo cual se incrementa cuando la zona mineralizada es profunda o el mineral tiene una ley relativamente baja.

El desmonte de mina es colocado en bancos con una inclinación del talud global en el rango de 1,5H:1V a 2,5H:1V, siendo de mayor inclinación en aquellos casos donde se espera optimizar el volumen del material almacenado. La altura del depósito de desmonte depende de una serie de factores como el volumen de producción, la topografía del terreno y las condiciones geotécnicas de la cimentación.

Los depósitos de desmonte de mina que contienen sulfuros son una de las principales fuentes de generación de drenaje ácido, más aún al estar expuestos a precipitaciones, escurrimientos y filtraciones. Después del vertido del material, la oxidación inicia inmediatamente por el ingreso de oxígeno a través de los espacios vacíos. En minería a tajo abierto, la generación de drenaje ácido se ha incrementado significativamente debido a que el volumen de material de desmonte extraído cada vez es mayor (Aduvire, 2006; Robertson y Kirsten, 1989).

2.4.3 Pilas de lixiviación

Los procesos de lixiviación son comunes en la extracción de minerales con una ley relativamente baja. El proceso consiste en regar una pila de material mineralizado con una solución que disuelve el mineral con valor económico, formando así una solución enriquecida que es transportada hacia la planta de procesamiento mediante sistemas de recolección en la base del apilamiento. La lixiviación del mineral puede realizarse con una solución de cianuro de sodio en el caso de minerales sulfurados con contenido de oro o plata; una solución de ácido sulfúrico en el caso de metales básicos como Cu o Ni; o mediante procesos bioquímicos con un pH bajo aplicables en la extracción de oro, cobre o uranio.

Estos procesos generalmente resultan en pilas con material lixiviado que pueden ser una fuente potencial de drenaje ácido, particularmente aquellas asociadas con lixiviados de pH bajo. Si bien es cierto que las operaciones de lixiviación con cianuro se llevan a cabo a un pH alto, el potencial de neutralización del lixiviado residual puede agotarse con el tiempo, dando como resultado un material generador de drenaje ácido (Robertson & Kirsten, 1989).

2.5 GEOSINTÉTICOS

De acuerdo con la norma ASTM D4439, los geosintéticos son productos planares fabricados de material polimérico, usados con suelo, roca u otro material relacionado con la ingeniería geotécnica, como parte integral de un proyecto hecho por el hombre, estructura o sistema. Los polímeros usados comúnmente en la fabricación de geosintéticos son: polietileno (HDPE y LLDPE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliéster (PET), poliestireno (PS), poliamidas (PA), polietileno clorosulfonado (CSPE) o polímeros termoestables (EDPM).

Los geosintéticos tienen las siguientes funciones: separación, reforzamiento, estabilización, filtración, drenaje, revestimiento, protección y control de erosión (IGS, 2018). Existen una amplia variedad de geosintéticos, tales como: geotextiles, geomallas, geonets, geomembranas, revestimientos geosintéticos de arcilla, geoceldas, geotubos, geoespumas y geocompuestos. Su aplicación ha sido principalmente en las áreas de transporte, geotecnia, ambiental e hidráulica. El uso de geosintéticos tiene principalmente dos objetivos: contar con diseños de mejor desempeño (p. ej., sin deterioro de material o filtración excesiva) y más económicos (además de un menor costo inicial se tiene un menor costo de reparación y mantenimiento por su durabilidad y tiempo de vida útil) en comparación a materiales y soluciones tradicionales (Koerner, 2005).

Los estándares de referencia más importantes para determinar las propiedades de los geosintéticos mediante ensayos de laboratorio son los estándares del *International Organization for Standardization* (ISO), *American Society Testing and Materials* (ASTM) y del *European Committee for Standardization* (CEN). Asimismo, para especificaciones técnicas u otros aspectos relacionados al uso de geosintéticos se cuenta con información proporcionada por *The Geosynthetic Institute* (GSI) y el *International Geosynthetics Society* (IGS).

2.5.1 Geomembranas

2.5.1.1 Definición y características principales

Las geomembranas son láminas flexibles fabricadas de uno o más materiales sintéticos bituminosos o poliméricos. Los materiales de fabricación más frecuentes son el HDPE, LLDPE, PP, PVC y EPDM, cada uno con diferentes características de flexibilidad, elasticidad, resistencia química y resistencia mecánica. Las geomembranas se caracterizan por ser productos relativamente impermeables, con una conductividad hidráulica mínima, entre 1×10^{-12} y 1×10^{-15} cm/s, por lo cual suelen ser empleadas como revestimiento para la contención de líquidos o gases.

La superficie de una geomembrana puede ser lisa o texturada, en este último caso una mayor aspereza permite una mayor fricción entre la geomembrana y el material adyacente. La aspereza es generada mediante procesos de coextrusión, impregnación de partículas calientes, laminación con espuma o estructuración con rodillos rotativos (Koerner, 2005). La Figura 2.3 muestra la superficie de una geomembrana texturada por coextrusión que es el método de fabricación más común. No obstante, algunos procesos de coextrusión que emplean gas nitrógeno pueden afectar la resistencia mecánica de la geomembrana.

Las propiedades mecánicas de las geomembranas están asociadas principalmente al espesor y tipo de polímero. El incremento del espesor en la geomembrana mejora su resistencia al punzonamiento y resistencia a la tensión, mientras que el tipo de polímero es determinante en el comportamiento esfuerzo-deformación, estas propiedades pueden variar dependiendo de la temperatura.

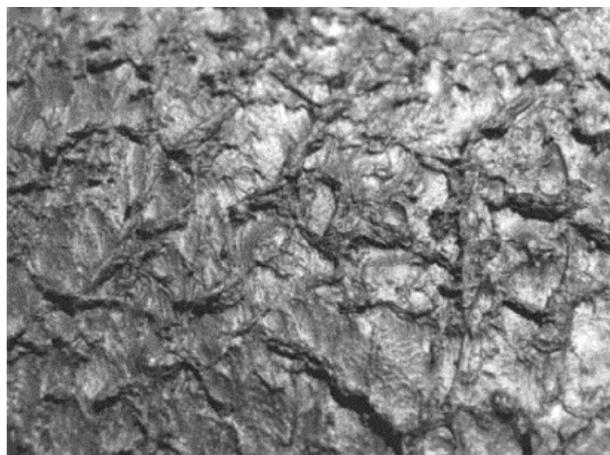


Figura 2.3 Superficie de geomembrana texturada por coextrusión. Fuente: Scheirs, 2009.

La instalación de geomembranas se realiza mediante procesos de soldadura por termofusión o extrusión que requieren mano de obra especializada. La representación gráfica de estos métodos se muestra en la Figura 2.4. La soldadura por termofusión consiste en unir los bordes de las láminas y aplicar presión vertical mediante dos rodillos pequeños a una temperatura alta, generando así la fusión superficial de la geomembrana. La soldadura por extrusión consiste en sellar el borde visible del traslape aplicando un cordón del mismo polímero, siendo efectivo para procesos de reparación (Touze-Foltz *et al.*, 2008).

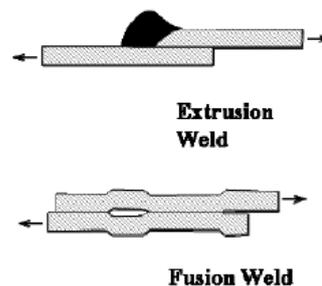


Figura 2.4 Esquema conceptual de soldaduras por extrusión y termofusión.
Fuente: Touze-Foltz *et al.*, 2008.

2.5.1.2 Tipos de geomembrana

Las geomembranas más empleadas en la industria minera son fabricadas con HDPE o LLDPE, con 1,5 a 2,0 mm de espesor. En los últimos años, se tiene una mayor preferencia en el uso de geomembranas de LLDPE para el revestimiento de componentes mineros, debido a su elongación y resistencia a la fricción (Breitenbach & Smith, 2006).

2.5.1.2.1 Geomembranas de HDPE

Las geomembranas de HDPE se caracterizan por presentar una resistencia mecánica alta y una resistencia química excelente frente a distintos tipos de sustancias, ello debido principalmente a su configuración molecular densa y microestructura cristalina mayor (40 a 50 %). Asimismo, también presentan una excelente resistencia al calor y a los rayos ultravioleta, lo cual permite su uso en zonas expuestas a la intemperie. Las geomembranas de HDPE tienen un espesor entre 0,75 a 3,0 mm.

Algunas de las limitaciones principales de las geomembranas de HDPE son: falta de flexibilidad que puede dificultar su instalación; un alto coeficiente de expansión

térmica que origina su dilatación y contracción así como el incremento de esfuerzos de tensión con los cambios de temperaturas; susceptibilidad a fallas de tipo ESC (*environmental stress cracking*) por su baja capacidad de deflexión; y la necesidad de una subrasante relativamente lisa para su instalación a fin de evitar rayaduras y punzonamientos (Scheirs, 2009).

2.5.1.2.2 Geomembranas de LLDPE

Las geomembranas de LLDPE se caracterizan por presentar una mayor flexibilidad y ser menos susceptibles a fallas por esfuerzos de agrietamiento en comparación a las geomembranas de HDPE, ello debido a que sus polímeros tienen una microestructura cristalina menor (15-20 %). Asimismo, presentan mayor resistencia a esfuerzos multiaxiales, mejores propiedades de elongación (uniaxial y multiaxial), mayor resistencia al punzonamiento a gran escala, y mayor adaptabilidad a la superficie del terreno durante la instalación. Las geomembranas de LLDPE tienen un espesor entre 0,5 a 3,0 mm. La resistencia a los rayos ultravioleta y la resistencia química en geomembranas de LLDPE son moderadas, por lo cual usualmente se encuentran enterradas o cubiertas. Asimismo, con relación a sus propiedades mecánicas, la resistencia a la tensión en geomembranas de LLDPE es menor con respecto a las de HDPE (Scheirs, 2009).

Tabla 2.4 Principales propiedades y estándares de referencia para ensayos en geomembranas de HDPE y LLDPE.

Propiedades	Unidad	Estándar de referencia
Espesor	mm	ASTM D5994
Altura de aspereza	mm	ASTM D7466
Densidad	g/ml	ASTM D1505/D792
Propiedades de tensión:		ASTM D6693
Resistencia a la fluencia y resistencia a la ruptura	N	
Elongación en fluencia y elongación en ruptura	%	
Resistencia al punzonamiento	N	ASTM D4833
Resistencia al desgarre	N	ASTM D1004
Resistencia a la tensofisuración (en HDPE)	h	ASTM D5397
Modulo secante al 2% (en LLDPE)	N/mm	ASTM D5323
Deformación de resistencia a la ruptura axi-simétrica (en LLDPE)	%	ASTM D5617
Contenido de negro de humo	%	ASTM D4218
Tiempo de oxidación inductiva (OIT)		
OIT estándar	min	ASTM D3895
OIT a altas presiones		ASTM D5885
Resistencia ultravioleta (UV)	%	ASTM D7238

Adaptado de: GRI-GM13 (2016) y GRI-GM17 (2015).

2.5.1.3 Estándares de referencia

Las principales propiedades físicas y mecánicas para caracterizar las geomembranas de HDPE y LLDPE (lisas y texturadas), así como los respectivos estándares para los procedimientos de ensayo, se indican en la Tabla 2.4. Las frecuencias mínimas de ensayo y propiedades recomendadas para geomembranas de HDPE y LLDPE se presentan en los estándares GRI-GM13 y GRI-GM17, respectivamente.

2.5.2 Revestimiento geosintético de arcilla (GCL)

2.5.2.1 Definición y características principales

De acuerdo con el estándar ASTM D4439, el revestimiento geosintético de arcilla (*geosynthetic clay liner*) es una barrera hidráulica fabricada con una capa de arcilla que se une a una o más capas de materiales geosintéticos. La capa de arcilla generalmente está conformada por bentonita de sodio o calcio y está unida a geotextiles o geomembranas mediante punzonado de fibras, costuras o adhesivos químicos.

La función principal del GCL es evitar la filtración de agua, lixiviados u otros líquidos y gases. El GCL tiene una conductividad hidráulica menor a 10^{-10} m/s aproximadamente, la cual se reduce cuando la bentonita tiene una menor relación de vacíos a medida que el esfuerzo de confinamiento se incrementa. La conductividad hidráulica es menor en la bentonita de sodio, lo cual permite reducir el espesor del GCL (Bouazza, 2002).

La bentonita tiene una capacidad de absorción significativamente alta debido a su estructura molecular. La cantidad de agua que puede absorber puede ser incluso mayor a 10 veces la cantidad de su masa en niveles bajos de confinamiento. No obstante, las propiedades hidráulicas de la bentonita pueden ser afectadas cuando el líquido contenido presenta una concentración alta de cationes, usual en soluciones lixiviadas, lo cual neutraliza la carga negativa de los silicatos reduciendo la capacidad de hidratación de la bentonita. Investigaciones recientes vienen desarrollando modificaciones en la composición de este material (p. ej. adición de carbonato de glicerina o carbonato de propileno), a fin de mejorar su desempeño hidráulico y resistencia química (Kong *et al.*, 2017).

En la mayoría de las aplicaciones, el GCL es usado como reemplazo o complemento de materiales de revestimiento tradicionales como geomembranas o capas de arcilla compactada. De acuerdo con Pries y Westhus (2014), teniendo en cuenta el intercambio iónico y la carga normal sobre el revestimiento, la conductividad hidráulica del GCL es equivalente al de una capa de arcilla compactada de 30 cm.

Las propiedades mecánicas del GCL pueden variar en función el desplazamiento, esfuerzo normal, hidratación de la bentonita u otros factores. La evaluación de la resistencia de un GCL debe tomar en cuenta la resistencia cortante interna y la resistencia cortante de la interfase entre el GCL y materiales adyacentes, ambas interfaces pueden constituir superficies críticas de falla dependiendo del nivel de confinamiento. Por otro lado, los efectos del corte a largo plazo (*creep*) en el punzonamiento y costuras del GCL también pueden afectar sus propiedades mecánicas y la integridad de la bentonita entre las capas de geotextiles (Fox *et al.*, 1997).

2.5.2.2 Reforzamiento interno en el GCL

Si bien es cierto que el GCL tiene una conductividad hidráulica baja, la hidratación de la bentonita origina una reducción de su resistencia interna cortante. Por tal motivo, un reforzamiento interno es necesario para un desempeño adecuado en aquellas aplicaciones donde el GCL podría estar sometido a esfuerzos de corte significativos. En función a ello, el GCL pueden clasificarse como: reforzado y no reforzado. La unión entre los componentes del GCL es muy diferente en ambos casos, lo cual influye en sus características físicas, mecánicas e hidráulicas. La Figura 2.5 muestra dos configuraciones de GCL no reforzados (con geotextil y geomembrana) y dos configuraciones de GCL reforzados.

a. GCL no reforzado

La fabricación de estos materiales generalmente consiste en mezclar la bentonita con un adhesivo y luego unir este material con las capas de geosintéticos. Los GCL no reforzados generalmente presentan una resistencia cortante relativamente baja. Su uso es común en superficies planas o ligeramente inclinadas donde los esfuerzos de corte son bajos y, al no incluir reforzamiento, es una alternativa que resulta económicamente viable.

b. GCL reforzado

El reforzamiento del GCL se realiza a fin de incrementar su resistencia interna frente a altas sollicitaciones de esfuerzo de corte. El método más común consiste en reforzar el GCL mediante el punzonado con agujas a través de la bentonita, desde el geotextil no tejido y la capa opuesta de geotextil. Los GCL punzonados usualmente tienen una mayor resistencia interna cortante debido a la conexión de las fibras de reforzamiento. No obstante, las capas de geotextil también pueden ser cosidas entre sí para confinar la bentonita y evitar la pérdida de material durante su instalación.

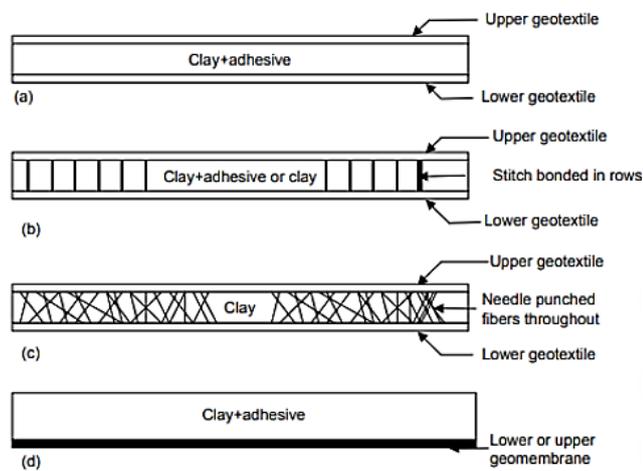


Figura 2.5 Configuraciones de GCL: (a) GCL con adhesivo; (b) GCL cosido; (c) GCL punzonado; (d) GCL con GM unida con adhesivo. Fuente: Kong *et al.* 2017.

2.5.2.3 Estándares de referencia

Las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas principales recomendadas para el GCL, así como los respectivos métodos y frecuencias mínimas de ensayos, se indican en la Tabla 2.5 de acuerdo con lo especificado en el estándar GRI-GCL3. En cuanto al diseño con GCL, el estándar GRI-GCL5 detalla distintos aspectos que deben tenerse en cuenta para su aplicación en el revestimiento de superficies de canales, rellenos sanitarios, depósitos de residuos mineros, entre otras aplicaciones.

Tabla 2.5 Propiedades principales, componentes (geotextil y bentonita) y estándares de referencia para ensayos de laboratorio en GCL.

Propiedad	Unidad	Estándar de referencia
Capa de bentonita		
Índice de expansión	ml/2g	ASTM D5890
Pérdida de fluido	ml	ASTM D5891
Geotextil		
Masa del geotextil (tejido o no tejido) por unidad de área	g/m ²	ASTM D5261
GCL		
Masa de GCL por unidad de área	g/m ²	ASTM D5993
Masa de bentonita por unidad de área	g/m ²	ASTM D5993
Contenido de humedad	%	ASTM D5993
Resistencia a la tracción	kN/m	ASTM D6768
<i>Peel strength</i>	N/m	ASTM D6496
Conductividad hidráulica	m/s	ASTM D5887
Flujo índice	m ³ /m ² /s	ASTM D5887
Resistencia interna cortante y en interfases	kPa	ASTM D6243

Adaptado de: GRI-GCL3 (2016).

2.5.3 Geomallas

2.5.3.1 Definición y características principales

Las geomallas son geosintéticos formados por una red uniforme de elementos conectados de forma integrada con aberturas mayores a 6,35 mm (1/4") para permitir el enclavamiento con el suelo, roca y otros materiales circundantes a fin de funcionar como elementos de reforzamiento (ASTM D4439). Las redes de filamentos pueden ser fabricadas de poliéster (PET), alcohol polivinílico (PAV), polietileno (PE) y polipropileno (PP), los cuales se diferencian entre sí por sus propiedades químicas y mecánicas. La selección del tipo de material depende de las condiciones de exposición y servicio específicas en cada aplicación (Repetto, 2013). Los filamentos se interconectan en nodos que proporcionan estabilidad dimensional a la estructura. El espesor y ancho de las fibras y nodos tienen un rol importante en las propiedades mecánicas de las geomallas tales como la resistencia a la tensión y módulo elástico (Al-Omari y Fekheraldin, 2012).

Las geomallas se caracterizan por tener una resistencia alta a la tensión y ser más rígidas en comparación a otros geosintéticos, tal como se observa en la Fig. 2.6. Por tal razón, son empleadas en el reforzamiento de taludes, terraplenes, muros de contención, cimentaciones, pavimentos, coberturas de cierre, entre otras aplicaciones.

El módulo elástico, o rigidez a la tensión (K_t), es la tangente de la curva de esfuerzo vs. deformación axial que se muestra en la Figura 2.6. La tangente de la curva se reduce a medida que la deformación axial se incrementa. Por tal motivo, las propiedades de tensión de la geomalla suelen ser caracterizadas para distintos niveles de deformación (2, 5 y 10 %).

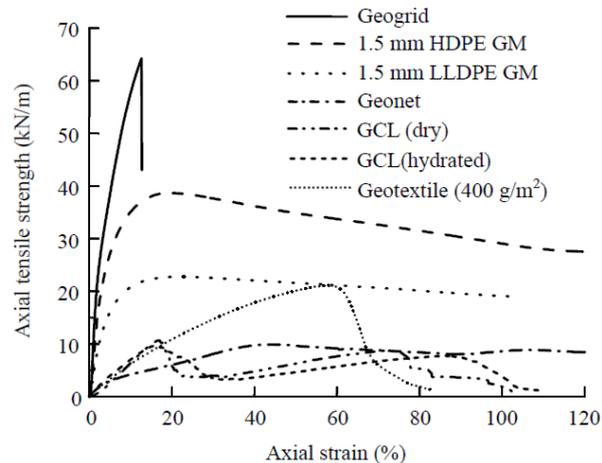


Figura 2.6 Comportamiento esfuerzo de tensión vs. deformación axial en materiales geosintéticos.
Fuente: Chen y Bin Zhu, 2009.

Por otro lado, la resistencia a la tensión a largo plazo (*creep*) es estimada mediante ensayos que consideran un periodo mínimo de 10 000 horas en la aplicación de la carga de tensión (ASTM D5262) o ensayos acelerados que aplican incrementos de temperatura progresivos basados en el concepto de superposición tiempo-temperatura (ASTM D6992). No obstante, esta resistencia generalmente es estimada mediante el uso de factores de reducción de acuerdo con los estándares GRI-GG4 (a) y GRI-GG4 (b) para geomallas flexibles y rígidas, respectivamente.

2.5.3.2 Tipos de geomallas

- *En función al tipo de unión:* los filamentos de la geomalla pueden unirse mediante procesos de extrusión, termofusión o entrelazamiento, en base a lo cual se clasifican como geomallas extruidas, geomallas soldadas y geomallas tejidas, respectivamente (ver Figura 2.7).
- *En función a la dirección de mayor resistencia a la tensión:* las geomallas también se clasifican como uniaxiales, biaxiales o multiaxiales. Esta clasificación es más usual en geomallas extruidas. Las dimensiones de los filamentos, la unión en los nodos y la forma de las aberturas es diferente en cada caso. En aquellas aplicaciones donde la dirección de los esfuerzos

mayores es conocida, se emplean geomallas uniaxiales. Los otros tipos se emplean cuando los esfuerzos aplicados tienen direcciones aleatorias.

- *En función a su rigidez flexural:* los estándares GRI-GG4 (a) y (b) clasifican a las geomallas como rígidas o flexibles. Si la geomalla presenta una rigidez flexural mayor a 1000 g-cm es clasificada como rígida, en caso contrario es clasificada como flexible. En general, las geomallas rígidas y flexibles suelen ser de polipropileno (PP) y poliestireno (PET), respectivamente. No obstante, algunas geomallas de PET también pueden tener una rigidez alta.

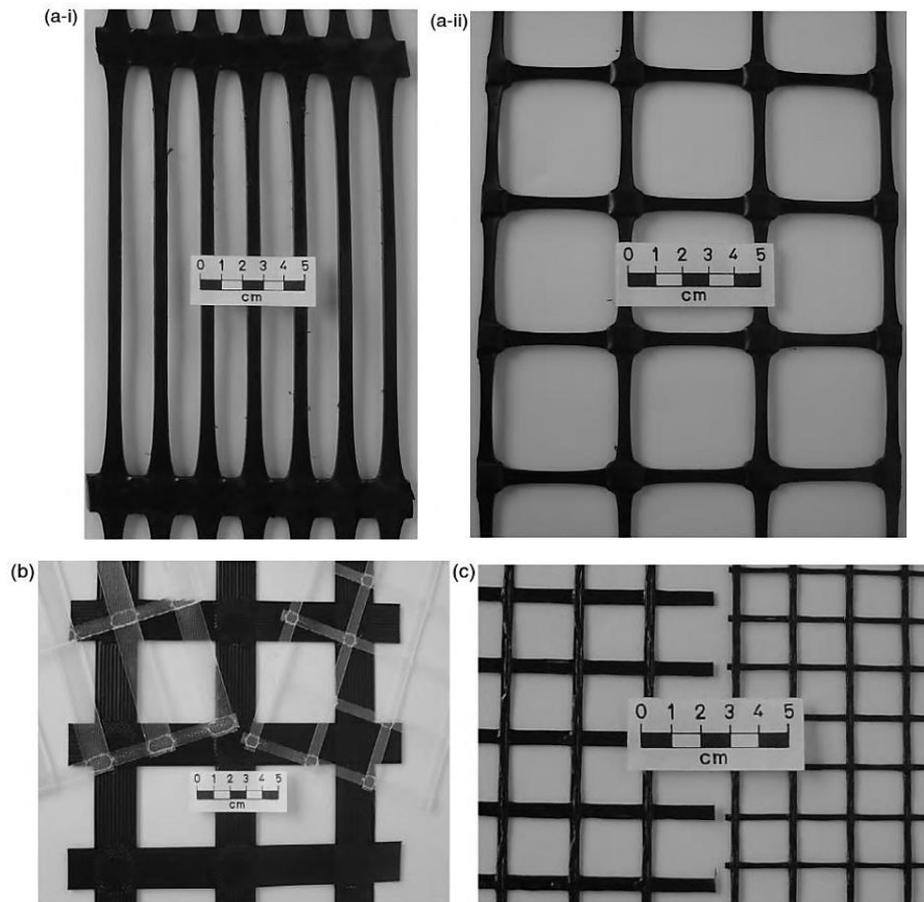


Figura 2.7 Geomallas (a-i) extruida-unidireccional, (a-ii) extruida-bidireccional, (b) soldada y (c) tejida. Fuente: Shukla y Yin, 2006.

2.5.3.3 Interacción suelo-geomalla

De acuerdo con Moraci *et al.* (2014), los mecanismos de interacción principales entre la geomalla y las partículas de suelo son: la fricción entre el suelo y la superficie de la geomalla (en dirección paralela al movimiento relativo del suelo) y la retención de las partículas de suelo (a través de esfuerzos normales al

movimiento relativo del suelo), tal como se ilustran en la Figura 2.8. En general, el primer mecanismo no es muy significativo debido a que el área de contacto entre la geomalla y la capa de suelo es mínima. En cambio, el segundo mecanismo permite el comportamiento en conjunto de ambos materiales, donde la geomalla y el suelo contribuyen en la rigidez a la tensión y compresión, respectivamente.

La geomalla tiene un espesor de influencia donde la interacción con el suelo es efectiva. Este espesor está asociado al tamaño de las partículas del suelo y la abertura de la geomalla. El límite donde la influencia de la geomalla es mínima en el comportamiento del sistema es conocida como la zona de ruptura. Jewell *et al.* (1984) recomiendan que el tamaño de la partícula de suelo sea similar al tamaño de la abertura de la geomalla, a fin de que la zona de ruptura no se encuentre próxima a la geomalla, por ello es usual el reforzamiento sea más efectivo con suelos gravosos que con suelos arenosos.

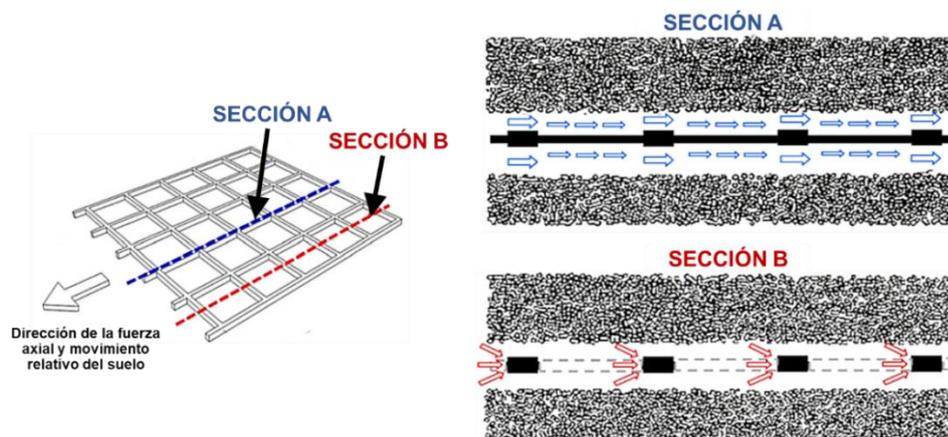


Figura 2.8 Mecanismos de interacción suelo - geomalla. Sección A-A: fricción entre superficies. Sección B-B: enclavamiento de partículas. Adaptado de: Moraci *et al.*, 2014.

La interacción entre la geomalla y el suelo también puede ser evaluada mediante la resistencia al arrancamiento (*pull-out*) que mide la fuerza requerida para remover la geomalla de la capa de suelo reforzada. De acuerdo con Teixeira *et al.* (2007), la resistencia máxima al arrancamiento está asociada a un espaciamiento óptimo en las fibras transversales de la geomalla. Si el espaciamiento es mayor o menor al espaciamiento óptimo, la resistencia al arrancamiento disminuirá por un menor entrelazamiento entre la geomalla y las partículas del suelo.

2.5.3.4 Estándares de referencia

Las propiedades físicas y mecánicas principales consideradas para caracterizar las geomallas y los respectivos estándares para los procedimientos de ensayo se indican en la Tabla 2.6. En general, estas características se miden tanto en la dirección longitudinal (DL) como en la dirección transversal (DT) debido a que los filamentos y uniones en la geomalla son diferentes en ambas direcciones.

Tabla 2.6 Propiedades principales de geomallas y estándares de referencia para ensayos de laboratorio.

Propiedades	Unidad	Estándar de referencia
Mecánicas		
Resistencia a la tensión última (DL, DT)	kN/m	
Resistencia a la tensión al 2% de deformación (DL, DT)	kN/m	ASTM D6637 y ASTM D4595
Resistencia a la tensión al 5% de deformación (DL, DT)	kN/m	
Elongación en carga máxima (DL, DT)	%	
Módulo elástico	kN/m	
Resistencia a la tensión en los nodos	kN/m	ASTM D7737
Rigidez flexural	g-cm	ASTM D1388
Resistencia a la degradación UV	%	ASTM D4355
Resistencia a la tensión a largo plazo (<i>creep</i>)	kN/m	ASTM D5262 ASTM D6692
Físicas		
Tamaño de la abertura (DL, DT)	mm	-
Ancho de las fibras (DL, DT)	mm	-
Espesor de nodos	mm	-
Espesor mínimo de las fibras (DL, DT)	mm	ASTM D1777
Peso molecular fibra	g/m	GRI GG8
Densidad por unidad de área	g/m ²	ASTM D5261

2.6 RESISTENCIA CORTANTE EN INTERFASES CON GEOSINTÉTICOS

El mecanismo de interacción entre geosintéticos con superficies continuas (p. ej., geotextiles, geomembranas, GCL o geocompuestos) y materiales adyacentes (capas de suelo u otro geosintético) es el corte generado en la interfase entre ambos materiales. Las interfases suelo-geosintético y geosintético-geosintético a menudo constituyen un plano de debilidad potencial, razón por la cual suelen ser determinantes en la estabilidad física de muchas estructuras geotécnicas, por lo tanto, es necesario una estimación adecuada de su resistencia cortante. Dixon (2010) sostiene que la resistencia cortante es producto de los fenómenos de deslizamiento, rodadura o adhesión que ocurren entre las partículas de suelo y la superficie del geosintético.

2.6.1 Estimación de la resistencia cortante en interfaces

La resistencia cortante en las interfaces con geosintéticos se evalúa a través de la movilización de la resistencia cortante (τ) en función al desplazamiento relativo entre ambos materiales (γ). A partir de la envolvente " $\tau - \gamma$ " se estiman las resistencias cortantes pico y residual (post-pico) de la interfase para un esfuerzo normal (σ_n) específico, tal como se observa en la Figura 2.9 (a). Las envolventes de resistencia cortante " $\tau - \sigma_n$ " se obtienen a partir de envolventes " $\tau - \gamma$ " generadas para diferentes esfuerzos normales, tal como se observa en la Figura 2.9 (b).

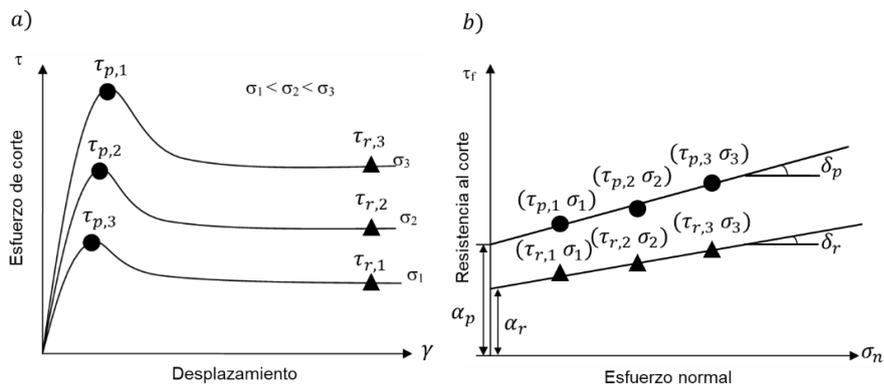


Figura 2.9 (a) Envolvente de esfuerzo de corte vs. desplazamiento para diferentes esfuerzos normales; (b) Envolvente lineal de las resistencias cortante pico (τ_p) y residual o post-pico (τ_r), en función al esfuerzo normal.

La correlación entre σ_n y τ tiene una tendencia no lineal que será más significativa dependiendo del tipo de material y el rango de esfuerzos normales considerado (Bacas *et al.*, 2015; Fox y Stark, 2015; Thielmann *et al.*, 2013; Parra *et al.*, 2012). Existen distintos enfoques para caracterizar la envolvente " $\tau - \sigma_n$ " no lineal (p. ej., Gilbert *et al.* 1996; Giroud *et al.* 1993), tal como se observa en la Figura 2.10.

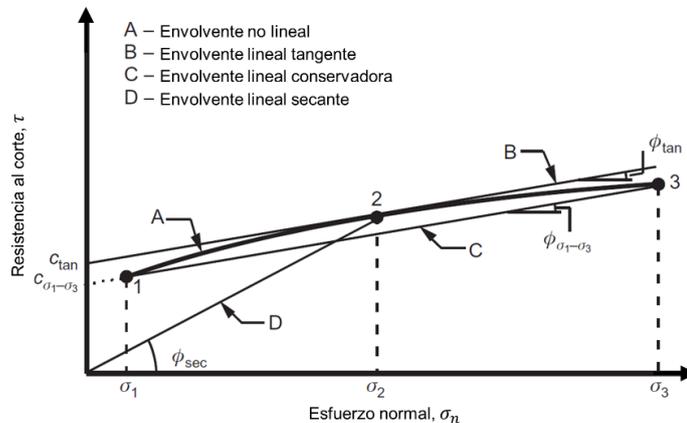


Figura 2.10 Caracterización de una envolvente no lineal de resistencia cortante vs. esfuerzo normal. Fuente: Fox y Stark, 2015.

El modelo Mohr-Coulomb es en algunos casos aplicado para definir parámetros representativos que definan la envolvente lineal de la resistencia cortante. En base a este modelo, la resistencia cortante se representa a través del ángulo de fricción (δ) y la adhesión aparente (α). El ángulo de fricción es la pendiente de la recta tangente a la envolvente y la adhesión es la intersección de la recta tangente con el eje vertical. Estos parámetros solo son válidos en un rango de σ_n específico donde la envolvente de resistencia cortante pico o residual puede aproximarse a una línea recta, tal como se observa en la Figura 2.9 (b). Las expresiones para estimar la resistencia cortante pico (τ_p) o residual (τ_r) son las siguientes:

$$\tau_p = \alpha_p + \sigma_n \tan(\delta_p) \qquad \tau_r = \alpha_r + \sigma_n \tan(\delta_r)$$

2.6.2 Ensayo de corte directo a gran escala

En 1992, el *Geosynthetic Research Institute* (GRI) adoptó el ensayo de corte directo a gran escala como el primer método estándar para la medición de la resistencia cortante en interfases. Existen distintos estándares que detallan el procedimiento de este ensayo (BS6906:1991; BS EN ISO 12957-1:2005; ASTM D5321; ASTM D6243; GDA E-38). Las diferencias principales entre estos estándares han sido discutidas en detalle por Dixon (2010) y Stowahse *et al.* (2002).

El estándar ASTM D5321 es la referencia más común para estimar la resistencia cortante en interfases suelo-geosintético y geosintético-geosintético. En el caso de interfases con GCL, la resistencia cortante (o su resistencia interna cortante) es estimada de acuerdo con el estándar ASTM D6243 que se diferencia del anterior principalmente por considerar una velocidad de desplazamiento mínima (1,0 mm/min) a fin de evitar un exceso de presión de poros en el ensayo.

2.6.2.1 Componentes del equipo de corte directo a gran escala

De acuerdo con el estándar ASTM D5321, los componentes principales del equipo de corte directo a gran escala son los siguientes:

- *Máquina de corte:* El aparato contiene dos contenedores (uno móvil y otro fijo) capaces de contener la muestra de suelo en su condición húmeda y lo suficientemente rígidos para no deformarse durante el corte del espécimen de ensayo. La dimensión mínima es de 300 mm (ó 12 veces el d_{85} del TM del suelo).

- *Dispositivo de aplicación de esfuerzo normal:* Capaz de aplicar y mantener un esfuerzo normal uniforme y constante durante la ejecución del ensayo. La aplicación de la carga puede ser a través de pesos o dispositivos de carga hidráulicos o neumáticos.
- *Dispositivo de aplicación de fuerza de corte:* Capaz de aplicar una fuerza de corte en dirección paralela al movimiento del contenedor y con una velocidad constante de desplazamiento. El equipo debe contar con un sistema de medición de carga y estar conectado a la máquina de corte de tal forma que el punto de aplicación de la carga sobre el contenedor móvil permanezca en dirección paralela al plano de corte de la interfase y no genere torsión mecánica.
- *Sensores de desplazamiento:* Permiten una medición continua del desplazamiento relativo en la interfase. Los indicadores deben tener una precisión mayor a 0,02 mm y medir un desplazamiento de al menos 75 mm.
- *Dispositivos de sujeción para el geosintético:* Permiten fijar el espécimen geosintético al contenedor móvil o estacionario durante el ensayo. Los elementos de sujeción no deben interferir con la superficie de corte.

El estándar ASTM D5321 solo describe las características básicas del equipo de corte directo. Actualmente, existen distintos tipos, cada uno con ventajas y limitaciones propias. La diferencia principal entre ellos es la forma de ajuste del contenedor superior y los mecanismos de aplicación y control de carga normal (Dixon, 2010; Texeira *et al.*, 2007). En la Figura 2.11 se muestra el esquema del equipo propuesto por Stoewhase *et al.* (2002) que, adicionalmente estima las fuerzas en los soportes verticales para estimar la fricción entre el material y las paredes del contenedor, facilitando así la calibración de la carga normal aplicada.

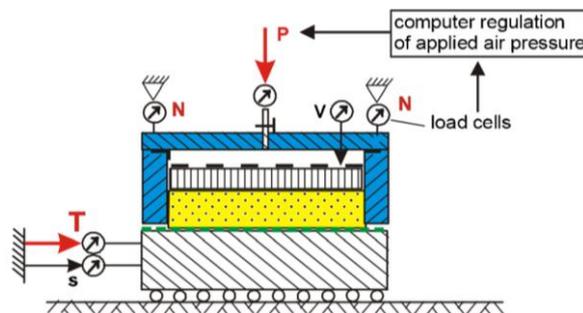


Figura 2.11 Equipo de corte directo para interfaces propuesto por Stoewhase. P: Presión de aire; N: fuerza de soporte vertical; T: fuerza de corte; s: desplazamiento; V: medidor de control de volumen. Fuente: Stoewhase *et al.*, 2002.

2.6.2.2 Procedimiento de ensayo

El ensayo comienza con la colocación de los materiales que conforman la interfase en el equipo de corte directo. En primer lugar, se fija los extremos del geosintético sobre la superficie del substrato rígido que se encuentra en el contenedor inferior. Luego, se fija ambos contenedores alineados verticalmente y se coloca la muestra de suelo en el contenedor superior con la densidad y humedad requeridas. Si la interfase es entre dos geosintéticos, el segundo es fijado por debajo de la superficie inferior del contenedor superior.

Una vez colocadas las muestras de suelo o geosintéticos se aplica un esfuerzo normal para asentar la muestra y se sumerge el espécimen en caso se trate de una condición saturada. Luego, se colocan los dispositivos de aplicación y control de carga y desplazamiento sobre ambos contenedores; se genera una pequeña abertura a fin de evitar que se generen fuerzas de fricción adicionales en la interfase; y sobre el contenedor superior se aplica el esfuerzo normal (σ_n) necesario para la prueba.

El corte en la interfase es generado con el desplazamiento del contenedor superior con una velocidad constante (< 5 mm/min), a fin de que no se genere un exceso de presión de poros. La fuerza horizontal necesaria para mantener el contenedor superior en su posición es medida durante la prueba, de tal forma que los esfuerzos de corte (τ) son registrados como una función del desplazamiento horizontal en la interfase (γ). La prueba culmina cuando el esfuerzo de corte permanece constante con el incremento del desplazamiento, donde se asume que se ha originado la falla de la interfase.

El procedimiento descrito permite obtener la envolvente " $\tau - \gamma$ ", a partir de la cual se determina la resistencia cortante pico (τ_p) y residual (τ_r) para un σ_n específico, de acuerdo con lo indicado en la Sección 2.6.1. El estándar ASTM D5321 establece que deben realizarse al menos tres pruebas con σ_n diferentes, de acuerdo con el nivel de confinamiento previsto.

2.6.3 Factores que influyen en la resistencia cortante

A continuación, se describen los factores principales que influyen en la magnitud de la resistencia cortante en interfases con geosintéticos:

- *Propiedades del suelo:* Choudhary y Krishna (2016) sostienen que el tamaño de la partícula incrementa la resistencia de la interfase suelo-geosintético. En ese mismo sentido, Ayala *et al.* (2014) indican que la resistencia cortante está en función de la clasificación del suelo, siendo mayor en suelos granulares y menor en suelos finos. La angularidad de las partículas también incrementa el ángulo de fricción de la interfase (Vaid y Rinne, 1995). Asimismo, Swan *et al.* (1991) verificaron que con una alta compacidad relativa del suelo se puede incluso duplicar la resistencia cortante obtenida.

- *Características del geosintético:* En interfases con geomembranas, los factores que influyen favorablemente en la resistencia cortante principalmente son la flexibilidad y la altura de aspereza. En cambio, en interfases con GCL los factores son múltiples, tales como: las características del geotextil, el tipo de reforzamiento interno y el comportamiento de la bentonita en diferentes condiciones.

- *Esfuerzo normal:* El esfuerzo normal es determinante en la interacción entre los materiales que conforman la interfase. Para bajos esfuerzos normales, la adhesión entre el suelo y el geosintético es menor, originando así que la fricción sea el mecanismo principal contra el corte. En cambio, para altos esfuerzos normales, dependiendo de la humedad y las características de la geomembrana o GCL, la adhesión puede ser más significativa reduciendo la influencia de la fricción en la resistencia cortante. Por otro lado, a medida que el esfuerzo normal se incrementa, los cambios en la estructura del suelo y la superficie del geosintético (p. ej., reordenamiento de las partículas de suelo o la reorientación de las fibras en el geotextil) son más significativos producto del corte, dando lugar a una resistencia cortante menor. Estos factores originan la tendencia no lineal en la envolvente " $\tau - \sigma_n$ " al evaluar un rango amplio de esfuerzos normales.

- *Velocidad de desplazamiento de corte:* Una tasa de desplazamiento mayor que la necesaria para mantener una condición drenada puede originar excesos de presión de poros. Asimismo, la velocidad debe ser lo suficientemente lenta para dar resultados representativos de las condiciones de corte a largo plazo. Thiel (2001) sostiene que la velocidad afecta a la resistencia pico de la interfase más que a la resistencia residual.

- *Hidratación:* Thiel (2001) sostiene que el contenido de humedad, el grado de saturación y el grado de consolidación pueden reducir la resistencia cortante en la

interfase. Ello se debe a los cambios físicos en las partículas y el efecto de la presión de poros que originan una menor fricción entre los materiales.

- *Envejecimiento y deformación (creep)*: Los efectos por la degradación y deformación del geosintético también son un mecanismo potencial que puede reducir la resistencia cortante en interfases. Aun no se han realizado muchos estudios que permitan cuantificar la reducción de la resistencia cortante a largo plazo en interfaces con geosintéticos. Zanzinger y Saathoff (2012) realizaron ensayos de falla por fluencia a largo plazo con GCL reforzado y estimaron que la resistencia interna del GCL a largo plazo podría ser tres veces menor que al inicio de su vida útil. Asimismo, Fox y Stark (2015) sostienen que la resistencia residual a corto plazo en interfases con GCL puede resultar similar a la resistencia pico estimada en condiciones de largo plazo.

2.6.4 Reducción de la resistencia cortante post-pico

Luego de alcanzar la resistencia cortante pico, la resistencia cortante usualmente experimenta una reducción con el incremento del desplazamiento relativo. Dixon (2010) sostiene que esta reducción se debe a los cambios en las propiedades físicas de los materiales que conforman la interfase, como resultado del corte producido. La movilización de los esfuerzos de corte a condiciones post-pico es generada por distintos mecanismos a corto y largo plazo.

2.6.4.1 Cambios en las propiedades de los geosintéticos

En interfases con geotextiles y GCL, el corte origina que las fibras que inicialmente se encuentran orientadas aleatoriamente sean realineadas en la dirección del desplazamiento debido a la rugosidad del material adyacente, lo cual también puede originar el desprendimiento de las fibras en la matriz del geotextil. En tal sentido, la resistencia cortante se reduce a medida que se incrementa el desplazamiento relativo en la interfase.

En interfaces con GM texturada, la reducción post-pico se debe a los cambios en la altura de aspereza, la cual puede reducirse debido a la fricción con el material adyacente. Este efecto es más significativo a medida que σ_n se incrementa. En interfases con GM lisa, McCartney *et al.* (2009) sostienen que no se observa una reducción significativa de la resistencia post-pico.

2.6.4.2 Cambios en las propiedades del suelo

En interfases suelo-geosintético, la resistencia pico puede ser reducida con el desplazamiento como resultado de la dilatación del suelo durante la formación del plano de corte. Este incremento en el volumen del suelo origina una reducción de la densidad y por lo tanto una reducción de la resistencia pico.

En interfases con suelos arcillosos, las partículas de arcilla también pueden experimentar una realineación en la dirección paralela a la interfase producto del corte, lo cual resulta en una reducción significativa de la resistencia pico. No obstante, ello dependerá del contenido de arcilla y su mineralogía. En cambio, en interfases con suelos granulares, la resistencia pico usualmente no se reduce de forma significativa e incluso puede continuar incrementándose a mayores desplazamientos. No obstante, en un estado drenado o en σ_n altos, la resistencia cortante sí puede experimentar una reducción significativa.

2.6.4.3 Movilización de esfuerzos post-pico

A corto plazo, durante la etapa de construcción, la movilización de los esfuerzos de corte se produce durante la colocación del material, lo cual induce desplazamientos en corte en la superficie del revestimiento. Asimismo, en la etapa de operación, las condiciones residuales pueden ser alcanzadas por la acción de cargas sísmicas; fenómenos de contracción y dilatación en el geosintético; posibles asentamientos en la superficie de apoyo del revestimiento o incrementos inesperados en la presión de poros (Thiel, 2001). A largo plazo, la aplicación de esfuerzos de corte permanentes y la deformación en el geosintético también originan la degradación de la resistencia cortante en la interfase y, por consiguiente, con una menor resistencia cortante es más probable que los esfuerzos cortantes se movilicen hasta alcanzar una condición residual. A menudo, estos mecanismos post-pico están asociados a una falla progresiva que culmina con un deslizamiento abrupto a lo largo de la interfase.

2.6.5 Selección de la resistencia cortante pico o residual

En el diseño y análisis de una estructura geotécnica, la selección de los parámetros de resistencia cortante pico o residual está basada en la evaluación de los mecanismos que pueden movilizar los esfuerzos post-pico, ya sea en las

etapas de construcción, operación o cierre, tal como se ha indicado en la sección anterior. Para tal fin, distintos autores han propuesto los siguientes criterios:

- Usar la resistencia pico de la interfase medida en condiciones de largo plazo (Zanzinger y Saathoff, 2012; Fox y Stark, 2015).
- Usar la resistencia residual de la interfase más débil (Stark y Poeppel, 1994) o la resistencia residual de la interfase con la menor resistencia pico (Gilbert y Byrne, 1996; Gilbert, 2001).
- Usar la resistencia pico en zonas planas y la resistencia residual en superficies inclinadas (Thiel, 2001).
- Usar la resistencia pico en zonas planas y en la cresta del talud; y la resistencia residual al pie del talud (Heerten, 1995).
- Usar la resistencia pico para condiciones estáticas (Koerner y Bowman, 2003).
- Usar la resistencia residual en condiciones sísmicas, especialmente cuando la aceleración de fluencia de la interfase es más pequeña que la aceleración horizontal pico (Richardson, 2002).

Algunas estructuras deben permanecer estables durante cientos de años, por lo cual su diseño debería considerar los parámetros de resistencia cortante estimadas en condiciones de largo plazo. Sin embargo, aún se están desarrollando investigaciones en distintos tipos de interfases para evaluar la degradación de la resistencia cortante en estas condiciones. Por tal motivo, si no se cuenta con estos parámetros, el diseño al menos debería considerar los parámetros de resistencia cortante en condición residual, más aun teniendo en cuenta que existen muchos mecanismos que pueden movilizar los esfuerzos de corte post-pico.

2.7 ENFOQUES DE DISEÑO DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO

El diseño de estructuras geotécnicas puede realizarse en base a un enfoque determinístico o probabilístico. La diferencia principal entre ambos enfoques es el manejo de la variabilidad e incertidumbre inherente en el diseño. Asimismo, el criterio de evaluación en ambos enfoques es diferente; por ejemplo, el enfoque determinístico considera un factor de seguridad (FS) representativo, mientras que el enfoque probabilístico considera una probabilidad de falla (P_f) o un índice de confiabilidad (β_N). La Figura 2.12 resume las características principales de estos

enfoques. Los fundamentos, características, criterios o procedimientos en cada enfoque son detallados en la presente sección.

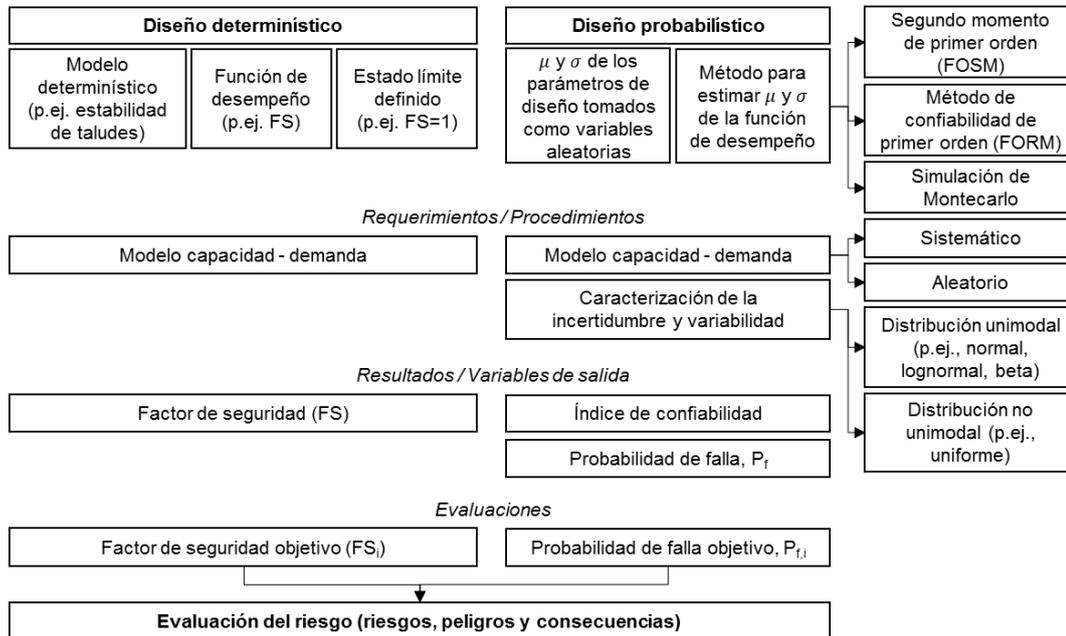


Figura 2.12 Comparación entre enfoques de diseño determinístico y probabilístico.
Fuente: Sia, 2007.

2.7.1 Enfoque de diseño determinístico

El diseño de la mayoría de estructuras geotécnicas tradicionalmente se realiza bajo un enfoque determinístico, el cual estima el comportamiento de la estructura con los valores más representativos de las variables de análisis. Este enfoque determina la confiabilidad del diseño empleando una función de desempeño $G(x)$ que evalúa la demanda (D) y la capacidad (C) del sistema. A partir de ello, los valores de $G(x)$ son evaluados con respecto a un valor de estado límite (G_o), separando los escenarios posibles en una región segura y una región de falla, tal como se observa en la Figura 2.13 (b). En general, G_o es igual a “0” si la función de desempeño es definida como un margen de seguridad (p. ej., C-D) o “1” si es definida como un factor de seguridad (p. ej., C/D). El propósito de considerar un margen o factor de seguridad es reducir el riesgo de un desempeño inadecuado en la estructura debido a la incertidumbre y variabilidad existente en los criterios y parámetros de diseño, tal como se muestra en la Figura 2.13 (a). El valor esperado de $G(x)$ aceptable para validar el diseño depende del conservadurismo deseado.

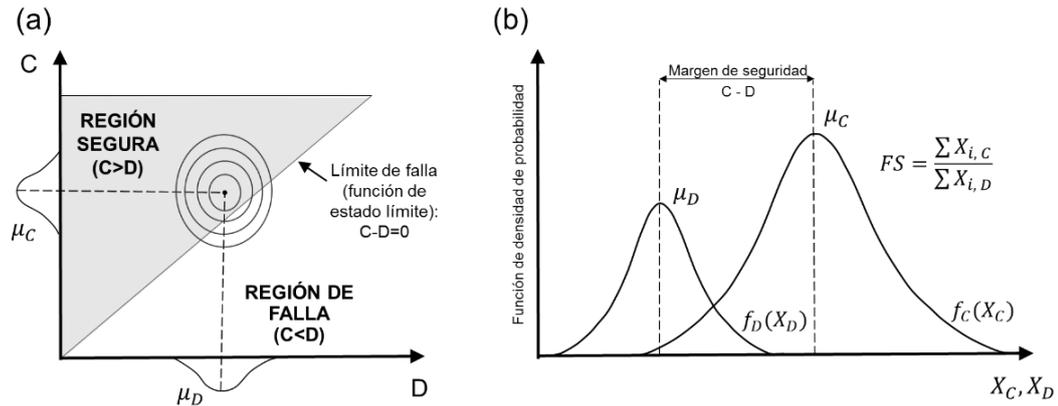


Figura 2.13 (a) Margen de seguridad representativo del diseño; (b) límite de falla, región segura y región de falla. Fuente: Sia, 2007.

En el análisis de estabilidad, la función de desempeño usualmente es el factor de seguridad (FS) que se obtiene a partir de parámetros específicos asociados a la capacidad y demanda del sistema ($X_{i,C}$, $X_{i,D}$). El valor de FS puede ser calculado con métodos analíticos o numéricos de diferente complejidad. Asimismo, en el diseño de una estructura no necesariamente puede definirse un único factor de seguridad. Por ejemplo, en coberturas de cierre, el FS puede definirse en función a las cargas resistentes y las cargas de deslizamiento en el sistema (Giroud *et al.*, 1995), en función a la resistencia y esfuerzos de corte movilizados en la interfase (Koerner y Soong, 2005) o en función a la tensión desarrollada en el reforzamiento (Bergado *et al.*, 2006).

2.7.1.1 Factores de seguridad empleados en el diseño

Un factor de seguridad de 1,5 usualmente es considerado como un criterio de diseño aceptable al evaluar la estabilidad física de taludes en la mayoría de estructuras geotécnicas. El uso de este valor prácticamente se ha generalizado en los últimos años. No obstante, su uso está más arraigado en el diseño de presas y no necesariamente es apropiado para otras estructuras. Liu y Gilbert (1996) sostienen que considerar ciegamente un factor de seguridad de 1,5 no es recomendable y que la selección del valor de FS debe ser específica para cada proyecto.

Duncan (2000) sostiene que un enfoque adecuado para la selección del factor de seguridad debe considerar la incertidumbre en el diseño, la variabilidad de los parámetros y las consecuencias de falla (o desempeño inadecuado) específicas para cada caso. De igual forma, Kulhawy y Phoon (1996) indican que FS debe

estar asociado a otros aspectos en el diseño, tales como: el modelo analítico empleado, la vida útil de la estructura (temporal o permanente), las condiciones de servicio, entre otros. En base a estos criterios, específicamente para coberturas de cierre, distintos autores han propuesto los siguientes factores de seguridad:

- Koerner y Song (2005) proponen FS mínimos entre 1,2 a 1,6 en función a la duración e importancia de la estructura, así como el tipo de residuo almacenado.
- Gilbert y Byrne (1996) sugieren FS mínimos en el rango de 1,3 a 1,5 si se considera la resistencia la corte pico de la interfase.
- Sabatini *et al.* (2002) sugieren FS mínimos entre 1,15 a 1,3 si se considera la resistencia cortante residual de la interfase.
- Datta (2009) consideran FS mínimos entre 1,0 a 1,5 función a la condición de servicio analizada (estática, filtración, sismo filtración y sismo).

2.7.1.2 Limitaciones del enfoque determinístico

La obtención de un parámetro único (p. ej., FS) para evaluar el diseño es la limitación principal del enfoque determinístico. Asimismo, no hay un consenso que defina factores de seguridad aplicables en el diseño asociados a otros aspectos como el nivel de riesgo o las condiciones de servicio. La práctica estándar suele aplicar ciegamente un FS de 1,5 o valores basados solo en la experiencia o criterios propios de cada autor sin un análisis previo que sustente el FS empleado. Por lo tanto, la falta de correlación entre el FS y la incertidumbre y variabilidad del diseño ha dado lugar a diferentes niveles de conservadurismo. Por otro lado, alcanzar un FS sin asociarlo a una probabilidad de falla o nivel de riesgo, no necesariamente garantiza un diseño o desempeño adecuado de la estructura. La probabilidad de falla podría ser muy alta, conduciendo a un diseño inadecuado o, por el contrario, podría ser muy pequeña conduciendo a un costo excesivo en su construcción (Kulhawy y Phoon, 1996; Liu *et al.*, 1997).

2.7.2 Enfoque de diseño basado en la confiabilidad (probabilístico)

Los enfoques y criterios considerados en el análisis de estabilidad han evolucionado como resultado del desarrollo de herramientas computacionales que permiten análisis más rigurosos. En este contexto, el enfoque de diseño determinístico viene siendo complementado con el enfoque de diseño basado en

la confiabilidad (RBD, *reliability-based design*) que permite una estimación más rigurosa y consistente de la estabilidad física a partir de un análisis probabilístico.

La aplicación del enfoque RBD en la ingeniería geotécnica ha sido recomendada por muchos investigadores (Duncan, 2000; Dixon *et al.*, 2006; Sia, 2007; Thiel, 2008). En Europa y Estados Unidos, el enfoque RBD ha sido incluido de forma simplificada dentro del Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) y el Diseño de Estado Límite (LSD) con la incorporación de factores de reducción calibrados previamente usando la teoría de confiabilidad a fin de garantizar un diseño adecuado (Phoon, 2016). Las ventajas principales de considerar el enfoque RBD son las siguientes (Sia, 2007):

- Ayuda en la toma de decisiones facilitando un diseño económico y seguro.
- Minimiza el potencial de falla y, por lo tanto, el costo de reparación.
- Reduce la incompatibilidad entre procedimientos de diseños diferentes.
- Proporciona un esquema lógico para la selección racional del factor de seguridad de diseño, de acuerdo con el grado de incertidumbre y consecuencias de falla que son específicas para cada caso de estudio.

En el enfoque RBD, la incertidumbre y variabilidad inherentes en el diseño son analizadas considerando las variables de análisis como variables aleatorias, cada una con una distribución de probabilidad representativa. Los parámetros estadísticos de cada variable aleatoria permiten evaluar todos los escenarios posibles en el análisis debido a su variabilidad, tal como se muestra en la Figura 2.13. A partir de ello, se genera una distribución de probabilidad representativa para la función de desempeño $G(x)$ con parámetros estadísticos específicos de acuerdo a su tipo de distribución, tal como se observa en la Figura 2.14, donde se muestra la función de densidad probabilidad de $G(x)$ que está representada por el factor de seguridad (FS), con una distribución normal representada por la media (μ_{FS}) y la desviación estándar (σ_{FS}). El valor más probable de FS (μ_{FS}) es el mismo valor obtenido con el enfoque determinístico usando los valores más representativos de las variables de análisis. Dependiendo de la función de estado límite que se haya definido en el diseño (p. ej., $FS = 1,0$), la distribución de probabilidad permite identificar aquellos escenarios que se encuentran en el dominio de falla ($FS < 1,0$) o en el dominio de seguridad ($FS >$

1,0), a partir de ello el riesgo en el diseño puede ser cuantificado con parámetros como la probabilidad de falla (P_f) o el índice de confiabilidad (β_i).

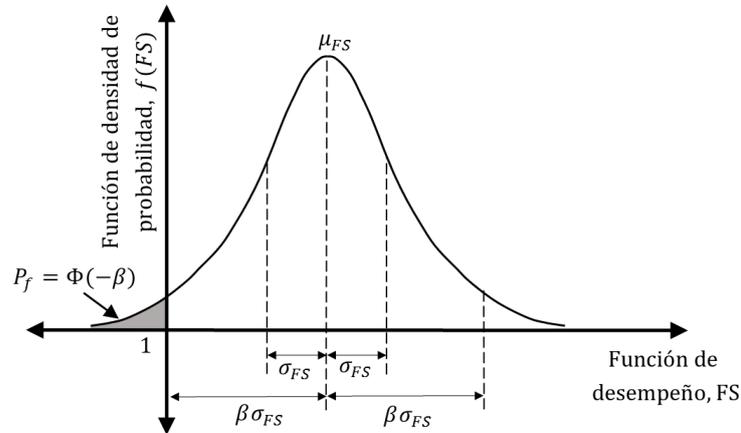


Figura 2.14 Distribución de probabilidad de la función de desempeño representada por FS y representación del rango de “falla” donde la función de estado límite es $FS=1,0$. Fuente: Sia, 2007.

El enfoque RBD considera valores mínimos de β_N y P_f como criterios de validación para el diseño. Estos valores son definidos en base a variables cualitativas (p. ej., riesgo o nivel de desempeño) o cuantitativas (p. ej., costo, función, ratios de falla, grado de daño esperado o consecuencias de la falla) definidas en función a las condiciones específicas identificadas en cada caso de estudio.

2.7.2.1 Probabilidad de falla

La probabilidad de falla es calculada directamente mediante la integración de la función de densidad de $G(x)$ en el dominio de falla. Por ejemplo, si la función de desempeño está representada por FS , la probabilidad de falla se obtiene calculando el área donde FS es menor al definido en el estado límite ($FS_{lím}$), tal como se indica en la siguiente expresión:

$$P_f = P(FS < FS_{lím}) = \int_{-\infty}^{FS_{lím}} f(x) dx$$

Donde: $f(x)$ es la función de densidad del conjunto de datos de la variable aleatoria que en este caso es FS . En el caso de una distribución normal, la función de densidad está definida por la siguiente expresión:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

La probabilidad de falla también puede ser estimada directamente mediante procesos de simulación de datos (p. ej., método de simulación de Monte Carlo), cuantificando los escenarios que se encuentran en el dominio de falla de $G(x)$ dentro del conjunto de datos obtenidos de la simulación (ver Sección 5.1.2).

2.7.2.2 Índice de confiabilidad

El índice de confiabilidad (β_i) representa la probabilidad de falla en una escala más conveniente. En general, β_i representa la relación entre el margen de seguridad (S) y la desviación estándar de la función de desempeño $G(x)$, de acuerdo a la siguiente expresión (USACE, 1995):

$$\beta_i = \frac{E[S]}{\sigma_G} = \frac{E[G(x) - G_0]}{\sigma_G}$$

Si la función de desempeño está definida por FS , β_i para una distribución normal (β_N) y lognormal (β_{LN}) puede calcularse con las siguientes expresiones:

$$\beta_N = \frac{\mu_{FS} - FS_{\lim}}{\sigma_{FS}}$$

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{\mu_{FS}}{FS_{\lim} \sqrt{1 + V_{FS}^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V_{FS}^2)}}$$

La correlación entre β_i y P_f tiene una tendencia significativamente no lineal que dependerá del tipo de distribución de FS . La Figura 2.15 muestra la relación entre ambos parámetros para una distribución normal.

En el diseño de la mayoría de las estructuras geotécnicas, si la función de desempeño tiene una distribución normal, β_N usualmente está en el rango de 1,0 y 4,0, estos valores están asociados a valores de P_f de 15 % y 0,003 % en promedio, respectivamente (Kulhawy y Phoon, 1996).

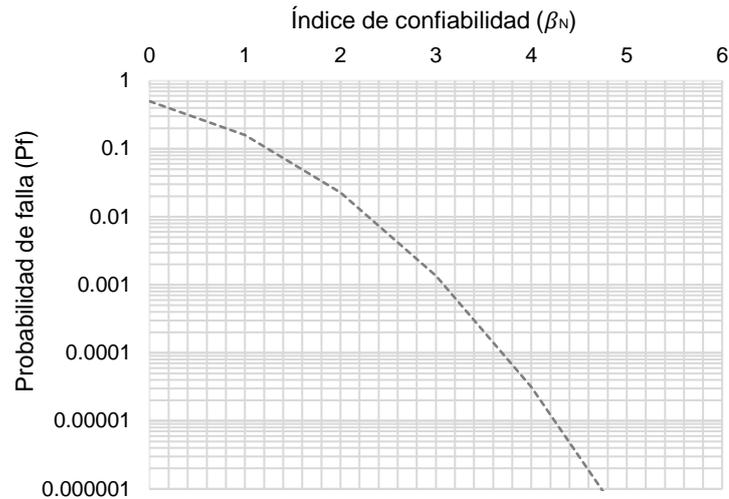


Figura 2.15 Probabilidad de falla en función del índice de confiabilidad para una distribución de probabilidad normal.

2.7.2.3 Procedimientos de cálculo aplicables

Los procedimientos de cálculo se enfocan en estimar β_i y P_f ya sea de forma directa (a través de la simulación de datos o la aplicación de métodos analíticos) o indirecta (a través de métodos simplificados para casos específicos de diseño). Los métodos más usados en la práctica son los siguientes:

a. Métodos indirectos:

Los métodos indirectos más comunes son el método FOSM (*First Order Second Moment*) y el método PEM (*Point Estimated Method*). El método FOSM se caracteriza por emplear series de Taylor y asumir que las variables aleatorias tienen una distribución de probabilidad normal. Su uso es el más extendido por ser relativamente simple. No obstante, no es aplicable si la función de desempeño es no lineal (Duncan, 2000; USACE, 1995). Por otro lado, el método PEM ajusta la distribución de probabilidad a una distribución equivalente a partir del valor promedio y desviación estándar de las variables aleatorias. La ventaja de este método es que puede ser aplicado en modelos analíticos con variables con cualquier tipo de distribución de probabilidad. No obstante, mientras mayor sea la cantidad de variables a menudo requiere el uso de matrices (USACE, 1995).

b. Métodos directos:

Los métodos directos más comunes son el método FORM (*First Order Reliability Method*) y el método de simulación de Monte Carlo (MSMC). El FORM se

caracteriza por ser el más preciso, no depender de una distribución de probabilidad en la función de desempeño ya que aplica un algoritmo de optimización en la función de estado límite para calcular β_i analíticamente (Low y Phoon, 2017). En cambio, el MSMC genera la distribución de probabilidad de la función de desempeño a partir de la simulación de múltiples análisis en función a la distribución de probabilidad de los parámetros de diseño. Por lo tanto, puede ser aplicado a funciones de desempeño no lineales y variables con distintos tipos de distribución.

En el MSMC, P_f se calcula a partir del conjunto de datos generado, no obstante, su precisión dependerá de la cantidad de simulaciones y la confiabilidad de los parámetros estadísticos definidos para cada variable de análisis.

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE COBERTURA CON GEOSINTÉTICOS

3.1 COBERTURAS DE CIERRE

Las coberturas de cierre son sistemas multicapa que se colocan sobre la superficie de depósitos de residuos mineros para asegurar su estabilidad química mediante el control del ingreso de oxígeno y agua, por lo cual cumplen un papel importante en la prevención del drenaje ácido. Asimismo, tienen fines paisajísticos y previenen el contacto de la escorrentía superficial con el material contenido en el depósito, evitando así problemas de erosión y transporte de partículas contaminantes.

Los sistemas de cobertura están conformados por múltiples capas, cada una tiene una función específica relacionada al manejo del agua superficial proveniente de la precipitación. El manejo del agua a través de las capas de una cobertura con una configuración típica se muestra en la Figura 3.1.

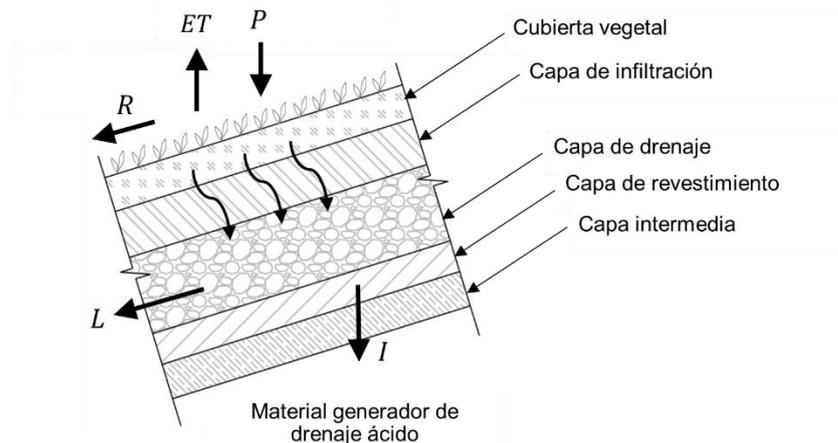


Figura 3.1 Configuración conceptual y balance hídrico de un sistema de cobertura.
Adaptado de: Aubertin *et al.* (2016).

De acuerdo con el balance hídrico, una porción de la precipitación que cae sobre la cobertura (P) se convierte en escorrentía superficial (R), otra porción se infiltra dentro de la cobertura y el agua restante se pierde a través de la evapotranspiración (ET). El agua que se infiltra dentro de la cobertura es conducida lateralmente a través un sistema de drenaje (L) y solo una porción mínima (I) entra en contacto con los residuos mineros.

3.1.1 Componentes principales

A continuación, se describen las funciones y características principales de las capas que conforman un sistema de cobertura (Repetto, 2013; Aubertin *et al.*, 2016):

3.1.1.1 Capa vegetal

Es una capa de suelo orgánico que favorece la evapotranspiración y el crecimiento de la vegetación. Asimismo, mejora el impacto visual de la zona; reduce los efectos de las fluctuaciones de temperatura y humedad; y previene la erosión de la cobertura disminuyendo la velocidad de la escorrentía superficial.

3.1.1.2 Capa de infiltración

También llamada capa de protección. Usualmente está compuesta por suelos granulares. Sus funciones principales son almacenar agua para prevenir la desecación de la cubierta vegetal y proteger la capa de revestimiento de la penetración de hielo e intrusión de raíces. Asimismo, separa la porción de agua que no llega a evaporarse en flujos de escorrentía e infiltración a fin de que ambos sean controlados de forma separada en las capas adyacentes.

3.1.1.3 Capa de drenaje

Es una capa permeable conformada por suelos granulares (arenas o gravas) o geosintéticos (geonet o geocompuestos de drenaje). Su función es reducir el gradiente hidráulico y la presión de poros, así como transportar lateralmente el agua que se infiltra dentro de la cobertura. Una cobertura sin capa de drenaje es susceptible a daños por acumulación de agua.

3.1.1.4 Capa de revestimiento

También llamada capa de retención de humedad. Está conformada por materiales de baja permeabilidad, tales como: suelos finos, geomembranas, GCL o una combinación de estos (revestimiento compuesto). Su función es desviar la dirección del flujo de infiltración; minimizar el ingreso de agua y oxígeno; y aislar los residuos almacenados del medio ambiente. Se ha observado que algunos suelos arcillosos pueden reducir la infiltración a niveles insignificantes; sin

embargo, las arcillas de alta plasticidad pueden ser susceptibles a la desecación y un eventual agrietamiento.

3.1.1.5 Capa de soporte

También llamada capa intermedia, está construida directamente sobre la superficie del depósito, sirviendo de base para las capas inferiores de la cobertura de suelo. Su función es evitar daños físicos y químicos que los residuos podrían originar en la capa de revestimiento. La Tabla 3.1 presenta un resumen de las características principales de cada componente de acuerdo con Aubertin *et al.* (2016).

Tabla 3.1 Características principales de las capas que conforman un sistema de cobertura típico.

Componente	Materiales empleados	Funciones principales	Espesor (cm)	K_{sat} (cm/s)
Cubierta vegetal	Suelo orgánico, geosintéticos perforados, lechos de piedra y grava.	Resistencia a la erosión y reintegración del sitio con el paisaje.	10 - 20	-
Capa de infiltración	Suelos granulares.	Protección de capas subyacentes y almacenamiento de agua.	< 100	-
Capa de drenaje	Suelos granulares (arenas y gravas) o geocompuestos.	Reducción del gradiente hidráulico y transporte lateral de agua.	30 - 60	$> 10^{-3}$
Capa de revestimiento	Suelos finos (limos y arcillas), geomembranas o GCL.	Reducción de la infiltración.	< 100	$< 10^{-7}$
Capa de soporte	Suelo granular (arenas y gravas), roca estéril.	Soporte de capas superiores.	< 30	$> 10^{-3}$

Fuente: Aubertin *et al.*, 2016.

3.1.2 Factores que influyen en su desempeño

Las características de la cobertura deben adaptarse a las condiciones locales en términos de clima, características hidrogeológicas, disponibilidad de materiales y propiedades de los residuos que se encuentran depositados. Asimismo, deben ser capaces de funcionar adecuadamente por un largo tiempo lo cual conlleva muchos desafíos en su diseño, construcción y mantenimiento (Aubertin *et al.*, 2016). Por lo tanto, el diseño de coberturas debe incluir una evaluación minuciosa de los factores que puedan afectar su desempeño, tales como las propiedades de los materiales, su configuración y la acción de agentes externos, los cuales se describen a continuación.

3.1.2.1 *Propiedades de los materiales*

Las propiedades hidráulicas de los materiales son el principal parámetro para definir el espesor de las capas de la cobertura, de tal forma que se garantice que la infiltración hacia el interior del depósito sea mínima. Por otro lado, sus propiedades físicas y mecánicas influyen en su desempeño a largo plazo y en su estabilidad física, respectivamente. Asimismo, los materiales que constituyen las diferentes capas deben ser estables y compatibles entre sí para evitar cualquier erosión interna o migración de partículas finas. Por tales motivos, una elección adecuada de los materiales a emplear y el respectivo control de calidad durante su instalación son aspectos fundamentales que merecen una especial atención a fin de garantizar el adecuado desempeño de la cobertura.

3.1.2.2 *Configuración de la cobertura*

La configuración de la cobertura puede optimizarse combinando dos capas (p.ej., la capa de drenaje y la capa de infiltración) o reduciendo su espesor empleando materiales de mejores características (p. ej., geosintéticos), de esta forma se mejora su eficiencia y se reduce los costos de suministro e instalación. Las condiciones específicas de cada proyecto muchas veces demandan el uso de geosintéticos. En coberturas de cierre, los geosintéticos son empleados con fines de impermeabilización (geomembranas o GCL), separación (geotextiles), protección contra la erosión (geoceldas), reforzamiento (geomallas) o drenaje (geocompuestos). No obstante, cada uno de estos materiales implica una serie de aspectos técnicos y económicos que deben ser evaluados en el diseño.

3.1.2.3 *Agentes externos*

Las condiciones climáticas son aspectos críticos en el desempeño de la cobertura. La temperatura puede originar niveles bajos de evaporación y ciclos de hielo - deshielo que generan agrietamientos en las capas de suelo, principalmente en arcillas de alta plasticidad (Wilson *et al.*, 2003). Asimismo, las precipitaciones originan fuerzas de flujo y reducción de los esfuerzos efectivos afectando así la estabilidad física de la cobertura de suelo. El diseño no solo debe considerar la intensidad de la precipitación sino también su duración y frecuencia. Por otro lado, la ocurrencia de eventos sísmicos y procedimientos constructivos inadecuados

pueden dar lugar a cargas no previstas en el diseño y, por consiguiente, posibles deslizamientos.

3.1.3 Ventajas y limitaciones del uso geosintéticos en coberturas

3.1.3.1 Uso de geosintéticos para impermeabilización (GM y GCL)

El uso de geomembrana (GM) o revestimiento geosintético de arcilla (GCL) permite reemplazar la capa de suelo de baja permeabilidad (SBP). Esta alternativa usualmente se evalúa cuando se prevé un incremento en el costo del transporte del SBP hasta el lugar de acopio cuando no se cuenta con canteras de este material próximas a la zona del proyecto o cuando la cantidad disponible no es suficiente para el cierre de todos los componentes. La disponibilidad limitada de SBP es usual durante el cierre de una mina debido a que las canteras ya han sido explotadas para el revestimiento basal de otros componentes mineros durante la etapa de operación. Asimismo, el espesor de la capa de revestimiento es significativamente menor en comparación a una capa de SBP.

La conductividad hidráulica baja en el GCL y la geomembrana permite conformar una barrera hidráulica más efectiva que minimiza la filtración de agua hacia el material generador de drenaje ácido. La geomembrana y el GCL también reemplazan o complementan la capa de SBP a fin de garantizar la impermeabilidad y durabilidad de la capa de revestimiento.

La selección del GCL o geomembrana como material de revestimiento depende de las condiciones específicas de cada proyecto, las cuales determinarán cuál es la alternativa técnica y económicamente más viable. Las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de ambos materiales son diferentes; por lo tanto, también presentan ventajas y limitaciones específicas que se indican a continuación:

a. Ventajas y limitaciones del uso de geomembrana

Los esfuerzos normales sobre la geomembrana suelen ser relativamente bajos en coberturas en cierre por lo cual no suelen alcanzar condiciones de fluencia por tensión. No obstante, ello debe verificarse con la distribución de los esfuerzos de corte. Asimismo, el efecto *creep* por la aplicación de esfuerzos permanentes podría afectar las propiedades mecánicas generando una elongación significativa y, en consecuencia, problemas de estabilidad física.

Algunas ventajas y limitaciones del uso de geomembrana dependen del tipo de polímero. Por ejemplo, las geomembranas de HDPE tienen una resistencia química alta lo cual evita que sean afectadas por los componentes químicos de los residuos mineros. No obstante, la falta de flexibilidad y menor resistencia a esfuerzos de tenso-fisuración puede dificultar su instalación, por lo cual usualmente requiere de una superficie relativamente lisa. Asimismo, teniendo en cuenta que la geomembrana estará cerca a la intemperie, es más susceptible a fenómenos de dilatación y contracción que puede afectar la estabilidad física de la cobertura de suelo. En cambio, las geomembranas de LLDPE son más flexibles, menos susceptibles a agrietamientos y más estables dimensionalmente. No obstante, la resistencia química y mecánica es menor en comparación a geomembranas de HDPE.

Una de las desventajas principales del uso de geomembrana es la resistencia cortante baja en las interfases con materiales adyacentes por tener una superficie con superficie continua plana, lo cual origina una superficie crítica de falla en la cobertura y, en algunos casos, la necesidad de medidas de reforzamiento que garanticen su estabilidad física. Asimismo, a veces suele protegerse la geomembrana con geotextiles ya sea por debajo (cuando se tiene subrasantes con superficies irregulares) o encima de la geomembrana (cuando las capas de suelo contienen partículas angulosas o para prevenir daños durante la construcción).

b. Ventajas y limitaciones del uso de GCL

Las ventajas principales del uso de GCL en coberturas de cierre son su adaptabilidad a la superficie del terreno, resistencia a ciclos de congelación, no requiere sellado de uniones (solo traslape), menor mano de obra calificada, entre otras ventajas. Asimismo, en taludes relativamente pronunciados (generalmente pendientes mayores a 1,5H:1V), el uso del GCL permite optimizar el tiempo y costo de instalación y evitar riesgos de seguridad en la ejecución de los trabajos, mientras que empleando SBP los trabajos de colocación y compactación resultan ser difíciles, demandan mayores costos e implican medidas de seguridad más rigurosas. Por otro lado, el GCL también presenta desventajas: el espesor limitado de la capa de bentonita puede producir vulnerabilidad a agentes mecánicos; en algunos casos requiere un determinado contenido de humedad para que la

capacidad de retención de flujo se active; y en interfases con geomembrana presentan una resistencia cortante baja donde la diferencia entre la resistencia pico y residual es significativa. Algunas ventajas y desventajas adicionales del uso de GCL se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas del uso de GCL.

Ventajas	Desventajas
Rápida instalación/ menor mano de obra calificada/ menor costo	Resistencia cortante baja de la bentonita hidratada (en GCL no reforzado)
Muy baja conductividad hidráulica si no son adecuadamente instalados	El GCL puede ser punzado durante o después de la instalación
No depende de la disponibilidad de suelos locales	Posible pérdida de la bentonita durante la instalación
Excelentes características de autocuración por la bentonita	Permeable al gas cuando la humedad de la bentonita es baja
Puede soportar grandes asentamientos diferenciales	Problemas de resistencia en interfases con otros materiales y posible reducción de la resistencia cortante pico
Fácil de reparar	Capacidad de atenuación de lixiviados baja
Mayor resistencia a efectos de ciclos de congelación (con bentonita mejorada)	Posible flujo a largo plazo por la reducción del espesor de la bentonita por la aplicación de esfuerzos normales
Prueba de conductividad hidráulica de campo no requerida	Posible incremento de conductividad hidráulica debido a problemas de compatibilidad con contaminantes
Menor espacio debido a su espesor	Posible flujo difusivo de contaminantes
El GCL hidratado es un revestimiento efectivo contra gases	Propenso a intercambio iónico (en el caso de GCL con bentonita de sodio)
Puede ser utilizado en subrasantes que presentan forma irregular	Propenso a desecación si no son cubiertos apropiadamente

Adaptado de: Bouazza, 2002.

3.1.3.2 *Uso de geosintéticos para reforzamiento*

El reforzamiento de coberturas de suelo se realiza colocando una geomalla por encima de la capa de revestimiento permitiendo que las partículas de grava se incrusten dentro de las aberturas de la geomalla. La ventaja principal del uso de la geomalla es la incorporación de una fuerza de tensión en sentido contrario a la dirección de deslizamiento, mejorando así la estabilidad física de la cobertura de suelo. Por tal motivo, su aplicación es recomendable en pendientes muy inclinadas, taludes de gran altura y en condiciones de servicio severas.

El uso de geomallas también permite reducir significativamente las cargas de tensión en otros geosintéticos de la cobertura (Palmeira, 2008), principalmente en aquellos cuya rigidez a la tensión es menor (p. ej., geomembranas o geocompuestos). Por lo tanto, se evita que los demás geosintéticos tengan deformaciones axiales que puedan conducir a un estado de fluencia o rotura. No obstante, el comportamiento de la geomalla es pasivo lo cual limita la tensión de

trabajo que solo se originará con la deformación axial del material. Por tal motivo, la efectividad del uso de la geomalla está condicionada a su rigidez a la tensión. Asimismo, la rigidez del suelo podría limitar la deformación generada disminuyendo la tensión en la geomalla.

La instalación de la geomalla es un proceso rápido y sencillo, no requiere mano de obra especializada ni equipos especiales para su montaje lo cual reduce el costo de instalación. No obstante, debido a las cargas de tensión, a menudo se requiere un anclaje de concreto o suelo colocados en zanjas ubicadas a lo largo de la cresta del talud. Las dimensiones del anclaje se incrementan a medida que los esfuerzos de tensión sean mayores incrementándose así el costo de construcción. Asimismo, en el caso de geomallas muy rígidas, las láminas suelen ser menos trabajables lo cual dificulta su instalación en superficies irregulares.

Una de las limitaciones principales del uso de la geomalla es su altura de influencia en la capa de suelo sobre ella que disminuye a medida que las partículas de suelo se encuentran más alejadas, por lo cual su aplicación puede resultar menos efectiva cuando la cobertura de suelo tiene un espesor considerable. No obstante, esta limitación suele ser superada mediante la colocación de geoceldas que se unen a la geomalla, lo cual también reduce el riesgo de erosión e incrementa la tensión de reforzamiento en el sistema (Foye, 2011; Senf, 2010).

3.2 INFLUENCIA Y EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN LA ESTABILIDAD FÍSICA

Durante una precipitación, el agua se infiltra a través de las capas de suelo hasta alcanzar la capa de revestimiento. La inclinación del talud y la presencia de una o más barreras hidráulicas en el sistema de cobertura (p.ej., geomembranas, GCL o SBP) permiten conducir el flujo de agua a través de la capa de drenaje hasta un sistema de recolección conformado por una red de tuberías o canales que se encuentra al pie del talud, tal como se observa en la Figura 3.2.

La influencia del flujo de agua en la estabilidad física se origina principalmente por la carga hidráulica (o espesor de flujo) medida desde la capa de revestimiento. Si el espesor de flujo es muy pequeño, teóricamente, la influencia de la carga hidráulica en la estabilidad de la cobertura sería insignificante y, viceversa, si el

espesor de flujo alcanza una fracción importante del espesor de la cobertura, sería muy probable la ocurrencia de un deslizamiento.

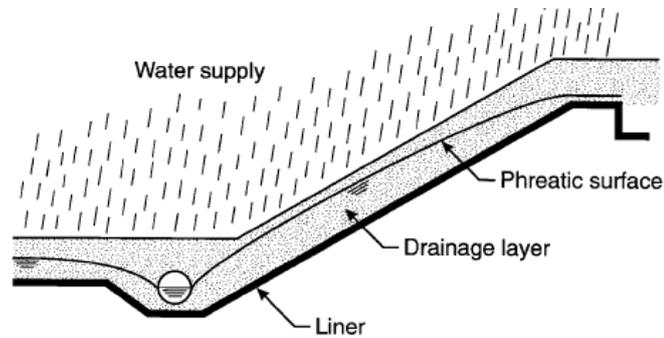


Figura 3.2 Flujo de agua en la capa de drenaje. Fuente: Giroud *et al.*, 1995.

La mayoría de unidades mineras en Perú se encuentran en las zonas con mayores precipitaciones anuales, tal como se muestra en la Figura 3.3. Asimismo, aún en zonas de climas áridos con baja precipitación, los sistemas de drenaje para condiciones de cierre y estructuras permanentes se diseñan con altos periodos de retorno. Por tal motivo, el diseño de sistemas de cobertura debe considerar necesariamente la influencia del flujo de agua en la estabilidad física.

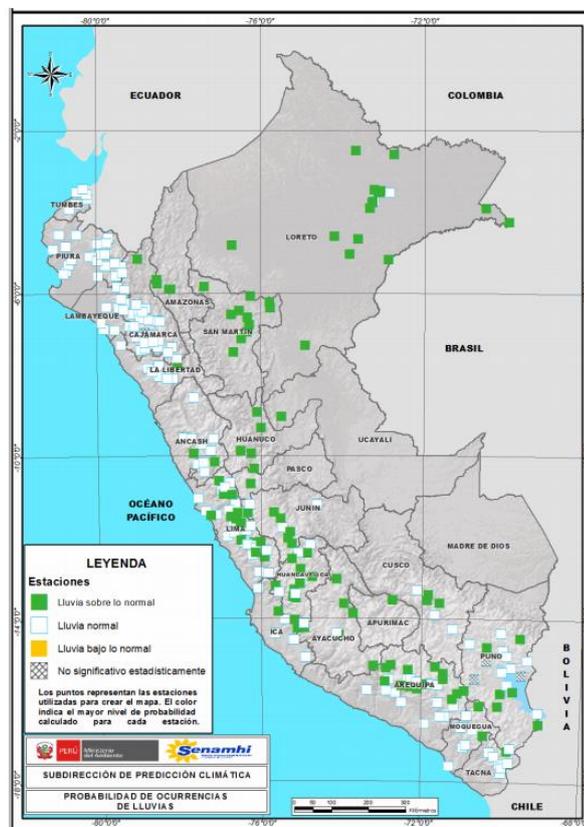


Figura 3.3 Mapa de probabilidad de ocurrencias de lluvias en el Perú. Fuente: SENAMHI, 2017.

3.2.1 Espesor de saturación

En general, un diseño adecuado es aquél donde el nivel de la carga hidráulica es menor que el espesor de la capa de drenaje. Giroud *et al.* (2000) hicieron un estudio detallado del flujo de agua en una capa de drenaje con un punto de recolección al pie del talud. A partir de dicho estudio, estos autores propusieron la siguiente expresión para estimar el espesor de flujo máximo ($h_{w,máx}$):

$$h_{w,máx} = \frac{(\sqrt{1 + 4\lambda} - 1) j L \tan\beta}{2 \cos\beta}$$

El factor de forma (λ) está asociado al perfil hidráulico y representa la relación entre el caudal de agua (q_h), la inclinación del talud (β) y la conductividad hidráulica de la capa de drenaje (k). Por otro lado, el factor de modificación (j) es introducido a fin de ajustar los resultados obtenidos de la ecuación empírica propuesta originalmente por Giroud *et al.* (1992) a valores más exactos obtenidos numéricamente mediante ecuaciones diferenciales. Los valores de λ y j se calculan con las siguientes expresiones:

$$\lambda = \frac{q_h}{k \tan^2\beta}$$

$$j = 1 - 0.12 \exp \left\{ - \left[\log \left(\frac{8\lambda}{5} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^2 \right\}$$

Un perfil hidráulico más uniforme está asociado a valores de λ altos que son usuales cuando las precipitaciones originan una tasa de flujo alta. En cambio, a medida que la tasa de flujo disminuye, la carga hidráulica se reduce en la cresta y se incrementa al pie del talud. El escenario más conservador es cuando λ es mayor a 0,25, tal como se muestra en la Figura 3.4. Por otro lado, el valor de j generalmente se encuentra en un rango entre 0,88 y 1,00. En un caso conservador, este valor puede omitirse a fin de considerar un mayor espesor hidráulico en el análisis.

Tal como se observa en la Figura 3.4, el nivel de carga hidráulica (h_w) no es exactamente paralelo al talud. No obstante, en el análisis de estabilidad física se suele considerar un espesor de flujo constante a lo largo del perfil hidráulico, con

un valor igual a la carga hidráulica promedio o igual al espesor total de la capa de drenaje asumiendo que se trata de una condición crítica.

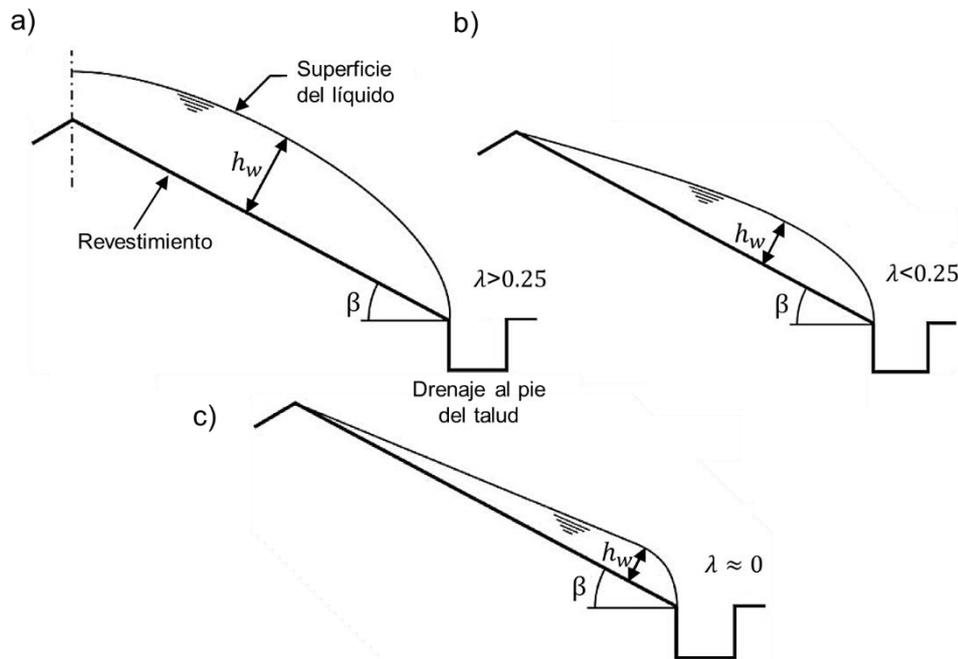


Figura 3.4 Perfil hidráulico en una capa de drenaje en función del parámetro adimensional λ : (a) $\lambda > 0,25$; (b) $\lambda \leq 0,25$ (c) $\lambda \approx 0$. Adaptado de: Giroud *et al.*, 2004

3.2.2 Influencia en la cobertura de suelo

De acuerdo con la mecánica de suelos y la teoría de flujo en medios porosos, los efectos principales del flujo de agua son la acción de fuerzas de empuje y fuerzas de arrastre sobre las partículas del suelo. Giroud *et al.* (1995b) sostienen que las partículas de suelo sujetas a estos dos efectos no se mueven debido a su densidad y por estar entrelazadas dentro de una estructura de suelo estable. Sin embargo, estos dos efectos, solos o combinados con otros, en algunos casos pueden causar la inestabilidad interna del suelo. Otro efecto importante del agua es el cambio de las propiedades mecánicas del suelo debido al incremento del contenido de humedad.

3.2.2.1 Fuerza de flotación

En una condición saturada, el agua ejerce una presión sobre la superficie de las partículas de suelo. La magnitud de esta presión varía proporcionalmente con la elevación, la cual resulta en una fuerza de empuje vertical (fuerza de flotación) que es igual al peso del agua que llenaría el volumen ocupado por las partículas

de suelo. En base a ello, considerando la porosidad (n) y la densidad de sólidos (ρ_s), la densidad de flotación (ρ_b) puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$\rho_b = (1 - n) (\rho_s - \rho_w)$$

La relación entre la densidad de flotación (ρ_b) y densidad saturada (ρ_{sat}) es la siguiente:

$$\rho_b = \rho_{sat} - \rho_w$$

Este efecto no se produce en las capas de la cobertura que contienen agua retenida por capilaridad, lo cual solo origina un incremento en la densidad total.

3.2.2.2 Fuerza de arrastre

El flujo de agua ejerce fuerzas de arrastre sobre las partículas de suelo. De acuerdo con la teoría de flujo en medios porosos, la fuerza resultante de arrastre sobre las partículas está en dirección del flujo y depende del gradiente hidráulico (i) y el volumen de agua (V_w), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$F_w = i \gamma_w V_w$$

La fuerza de arrastre también depende de la conductividad hidráulica (k) de la capa de drenaje, debido a su influencia en la saturación del suelo y el incremento de la carga hidráulica. Si k disminuye, el espesor de flujo en la capa de drenaje (h_w) se incrementará y, por consiguiente, también la fuerza de arrastre (F_w).

3.2.3 Influencia en los esfuerzos sobre la capa de revestimiento

La saturación del suelo incrementa el peso total de la cobertura y, en consecuencia, también incrementa los esfuerzos totales en la misma magnitud por debajo y sobre el revestimiento. No obstante, los esfuerzos efectivos son diferentes en ambos lados debido a la presión de poros existente.

El esfuerzo normal efectivo (σ'_n) sobre el geosintético resulta del peso sumergido y es obtenido proyectando dicha carga en dirección normal al talud. Por lo tanto, en una cobertura de suelo con carga hidráulica (h_w), el esfuerzo efectivo normal sobre el geosintético se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma'_n = \gamma_b h_w \cos\beta + \gamma_d (h - h_w) \cos\beta$$

Por otro lado, la presión de agua en los poros es nula por debajo del geosintético y los esfuerzos efectivos son idénticos a los esfuerzos totales en la dirección normal al plano de deslizamiento ($\sigma'_n = \sigma_n$), siempre y cuando no existan filtraciones por debajo del geosintético. Por lo tanto, el esfuerzo efectivo normal estará determinado principalmente por la proyección perpendicular del peso de la cobertura de suelo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\sigma'_n = \gamma_{sat} h_w \cos\beta + \gamma_d (h - h_w) \cos\beta$$

El incremento de h_w también origina la reducción de la resistencia cortante en la interfase que se encuentra sobre el geosintético como consecuencia de la reducción de σ'_n . Ello sumado al incremento de las fuerzas de deslizamiento (por un mayor peso en la cobertura) genera un mecanismo de falla que al alcanzar un nivel de h_w crítico originará el deslizamiento inminente de la cobertura.

3.3 INFLUENCIA Y EVALUACIÓN DE LA CARGA SÍSMICA EN LA ESTABILIDAD FÍSICA

La carga sísmica genera la disminución del esfuerzo normal en el revestimiento y, en consecuencia, la reducción de la resistencia cortante en la interfase crítica. Asimismo, incorpora una carga adicional en la dirección de desplazamiento. Estos efectos pueden originar condiciones residuales en la interfase crítica favoreciendo así el deslizamiento de la cobertura de suelo. Por tal razón, la carga sísmica es considerada como uno de los mecanismos de falla principales en sistemas de cobertura (Feng & Gao, 2012).

La carga sísmica en la cobertura está en función de la aceleración inducida por el sismo, la cual puede ser mayor a la aceleración del terreno por la amplificación del movimiento sísmico a través del depósito de residuos, dependiendo de las propiedades dinámicas del material contenido (relave, desmonte o material lixiviado). Incluso en áreas de intensidad sísmica moderada, este fenómeno puede limitar la inclinación final del talud y, por consiguiente, también la capacidad de almacenamiento del depósito.

La evaluación de la estabilidad sísmica en un sistema de cobertura involucra cuatro etapas que pueden ser desarrolladas mediante métodos simplificados o rigurosos (Bonaparte *et al.*, 2004), las cuales se describen a continuación:

3.3.1 Evaluación de peligro sísmico

El objetivo de la evaluación de peligro sísmico es caracterizar el sismo de diseño con respecto a parámetros como la magnitud del sismo, el tipo de falla, la distancia de la fuente al sitio, la aceleración máxima del suelo y la aceleración espectral. La aceleración máxima de la roca basal en el sitio de estudio puede ser estimada a partir de mapas de peligro sísmico o una evaluación específica del peligro sísmico en base a enfoques determinísticos o probabilísticos (con un periodo y probabilidad de excedencia). La evaluación del peligro sísmico involucra la identificación de las fuentes sísmicas existentes, la evaluación de su potencial y la estimación de la intensidad de movimiento.

3.3.2 Análisis de respuesta sísmica

El análisis de respuesta tiene el propósito de estimar la intensidad del movimiento inducido por el sismo, ya sea en la superficie del suelo o en la superficie del depósito de residuos. El análisis de respuesta puede ser unidimensional o bidimensional (en función a la geometría de la superficie de cierre), toma en cuenta las propiedades dinámicas de los materiales (módulo de corte y módulo de amortiguamiento) y requiere de un acelerograma obtenido durante un sismo o un acelerograma sintético que haya sido escalado al espectro de respuesta de sitio definido en el estudio de peligro sísmico.

3.3.3 Estimación de la resistencia cortante en condición dinámica

El movimiento sísmico puede dar lugar a una degradación de la resistencia cortante en las capas de suelo e interfases de la cobertura. Por tal motivo, la resistencia cortante en condiciones estática y dinámica en estos componentes también deben ser estimadas a fin de realizar los análisis de estabilidad o deformación.

Las propiedades dinámicas suelen ser obtenidas a partir de ensayos de corte cíclicos. No obstante, en el caso de interfases con geosintéticos, la información disponible es muy limitada y la mayoría de los laboratorios no cuenta con el equipo

necesario para la ejecución de dicho ensayo. Bonaparte *et al.* (2004) sostienen que la resistencia cortante dinámica puede ser asumida igual a la resistencia cortante estática cuando no se produce una degradación significativa de la resistencia cortante durante la ocurrencia de la carga sísmica. Chaney *et al.* (1997) y Yegian *et al.* (1992) verificaron que el uso de la resistencia cortante estática para interfases con geomembranas en análisis dinámicos incluso puede ser un criterio muy conservador. Asimismo, Lai *et al.* (1998) comprobaron que la resistencia cortante del GCL en condición seca es la misma durante y después de la carga sísmica.

3.3.4 Análisis pseudoestático y análisis de desplazamientos permanentes

El comportamiento sísmico de la cobertura puede ser evaluado de forma simplificada estimando el desplazamiento sísmico permanente o calculando el factor de seguridad en condiciones pseudoestáticas. La descripción de ambos métodos es detallada a continuación:

3.3.4.1 Análisis pseudoestático

El análisis pseudoestático es el método más común en el diseño sísmico de sistemas de cobertura con geosintéticos. El método consiste en realizar el análisis de equilibrio límite representando la carga sísmica como una fuerza horizontal aplicada en el centro de masa del bloque deslizante. Si bien es cierto que la carga sísmica es el resultado de la aceleración inducida por el sismo sobre la masa del bloque deslizante y es variable durante la ocurrencia del sismo, el análisis pseudoestático considera una única aceleración que es una fracción de la aceleración horizontal máxima dividida entre la gravedad, la cual es conocida como el coeficiente sísmico (k_h). El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers*, 2003) sugiere el uso de un coeficiente sísmico igual al 50 % del PGA o una fracción que varía entre 1/3 a 1/2 de dicho valor. La limitación principal del análisis pseudoestático es la incertidumbre y variabilidad en el factor de seguridad obtenido debido a la dificultad en la estimación adecuada del valor de k_h (Bonaparte *et al.*, 2004)

3.3.4.2 Análisis de desplazamientos permanentes

El desempeño sísmico también puede ser evaluado estimando el desplazamiento permanente inducido por el sismo en la masa de suelo deslizante. El cálculo de

desplazamiento permanente puede realizarse con métodos analíticos o simplificados que se basan en modelos acoplados, modelos desacoplados o, en la mayoría de los casos, en el modelo de bloque rígido de Newmark. La fuente principal de incertidumbre en el cálculo de desplazamientos permanentes con los métodos existentes es la caracterización del movimiento del suelo. Strenk (2010) sostiene que es imposible generalizar un método que sea aplicable universalmente para todos los taludes y condiciones de carga sísmica; por lo cual los desplazamientos permanentes deben ser evaluados en base a las condiciones específicas de sitio que incluyan la información requerida para calcular la aceleración de fluencia (p. ej., geometría del talud, geometría de la masa deslizante, parámetros de resistencia cortante y carga hidráulica) y la demanda sísmica (PGA, velocidad de ondas de corte, entre otros).

En general, los métodos acoplados tienen una mejor precisión por evitar suposiciones *a priori* y desarrollar mecanismos de falla compatibles con la respuesta dinámica del sistema. No obstante, requieren más información y el uso de herramientas computacionales más avanzadas. Por ello, suele recomendarse la aplicación de métodos simplificados basados en modelos acoplados, tales como los métodos propuestos por Bray y Travasarou (2007) y Bray *et al.* (2018), aplicables en el caso de sismos corticales y sismos de interfase, respectivamente.

La estimación del desplazamiento sísmico no debe ser considerada como una medida exacta del desplazamiento de la cobertura sino solo como un índice de su desempeño sísmico. Asimismo, es un complemento para el análisis pseudoestático al permitir estimar el coeficiente sísmico (k_h) en función a un nivel de desplazamiento admisible en la estructura y un periodo de retorno asumido.

3.4 EVALUACIÓN DE CARGAS DE TENSIÓN EN GEOSINTÉTICOS

Las cargas de tensión solo pueden ser calculadas en los geosintéticos que se encuentran por encima de la interfase de menor resistencia cortante. Los métodos existentes para el cálculo de la carga de tensión se diferencian por el mecanismo de transferencia de cargas y las propiedades mecánicas que consideran en los componentes de la cobertura.

Los enfoques tradicionales (método de equilibrio límite y método límite) principalmente consideran el equilibrio de fuerzas en el sistema, lo cual es una de

sus principales limitaciones. Por otro lado, métodos más rigurosos como el método de columna compuesta simple adicionalmente consideran la compatibilidad de deformaciones entre los componentes de la cobertura. Los criterios, procedimientos y limitaciones de cada enfoque se detallan a continuación:

3.4.1 Enfoque basado en el método de equilibrio límite (MEL)

El método de equilibrio límite permite determinar el FS basándonos en el equilibrio de fuerzas. Los métodos que comúnmente se emplean basándose en este enfoque son los métodos propuestos por Koerner *et al.* (2005), Feng *et al.* (2012) y otros, los cuales generalmente dividen el sistema de cobertura en dos cuñas.

De acuerdo con este método, la resistencia en la cobertura contra el deslizamiento es proporcionada por la resistencia cortante desarrollada en la interfase (F_s), la resistencia pasiva del suelo desarrollada al pie del talud (C) y la tensión desarrollada en los geosintéticos que se encuentran sobre el plano de deslizamiento (T_{gs}). El MEL proporciona dos ecuaciones de equilibrio, pero presenta tres incógnitas, por lo cual son necesarias algunas asunciones a fin de satisfacer las ecuaciones de equilibrio.

La principal asunción en el MEL es la secuencia específica que se considera para la transferencia de carga en los componentes de la cobertura. En tal sentido, el MEL asume que la resistencia es movilizada inicialmente a través de la interfase (S_A); cuando las fuerzas de deslizamiento exceden las fuerzas resistentes proporcionadas por S_A , la fuerza resistente adicional necesaria para el equilibrio es proporcionada por la resistencia pasiva del suelo (C); y cuando las fuerzas de deslizamiento exceden S_A y C , las cargas de tensión en los geosintéticos recién son movilizadas para satisfacer el equilibrio. De acuerdo con Long (1994), las asunciones que justifican la secuencia para la distribución de cargas axiales en cada componente son las siguientes:

- Un desplazamiento muy pequeño a lo largo de la interfase es suficiente para movilizar la resistencia cortante a lo largo de toda la interfase; por lo tanto, este componente movilizará la resistencia cortante al inicio.
- El segundo componente para movilizar la carga axial es la cobertura de suelo. Se asume que la rigidez axial de la cobertura es mucho más grande en

comparación a la rigidez axial de los geosintéticos sobre la interfase de deslizamiento.

- Las cargas de tensión se desarrollan en los geosintéticos al final, por ser el componente menos rígido.

De acuerdo con estas asunciones, la tensión requerida para analizar la estabilidad puede ser obtenida asumiendo un FS específico que generalmente es igual a la unidad. Si el valor de T_{gs} es negativo después de que la resistencia cortante de la interfase ha sido excedida, la carga axial en la cobertura de suelo es movilizada antes de desarrollarse las cargas de tensión en los geosintéticos. De igual forma, si T_{gs} es positivo, se asume que la resistencia cortante de la interfase y la carga axial en la capa de protección del suelo son completamente movilizadas.

Este enfoque resulta en una desestimación de la tensión en los geosintéticos al no ser estimadas hasta que las fuerzas resistentes al pie del talud (fuerzas normales y fuerzas de rozamiento en la cuña pasiva) son excedidas; sin embargo, las cargas de tensión podrían ocurrir en cualquier inclinación de talud. Asimismo, las mismas deformaciones axiales requeridas para movilizar la resistencia axial en el suelo también ocurren en los geosintéticos originando una tensión que no es incluida en el cálculo. El MEL no considera la rigidez de estos componentes y tampoco permite estimar la distribución de la carga axial en las capas de geosintéticos al asumir la secuencia para la movilización de la resistencia.

3.4.2 Enfoque basado en el método límite (ML)

El método límite está basado en las formulaciones de Richardson y Koerner (1987) y Koerner y Hwu (1991). La distribución de esfuerzos en cada componente se realiza mediante una combinación de esfuerzos de tensión y de corte, tal como se observa en la Figura 3.5. Los esfuerzos de corte movilizados en las interfases son calculados en orden descendente desde la capa superior hasta la capa inferior del revestimiento, tomando como dato inicial la fuerza de corte transmitida por la cobertura de suelo sobre el primer geosintético. La resistencia cortante movilizada por encima (τ_U) y debajo (τ_L) de cada geosintético es obtenida seleccionando el menor valor entre el esfuerzo de corte aplicado y la resistencia cortante de cada interfase ($\tau_{r,U}$ y $\tau_{r,L}$). Si $\tau_U > \tau_L$, el geosintético entrará en un estado de corte. Para una condición de equilibrio, la diferencia de $\tau_U - \tau_L$ se transferirá al

geosintético mediante esfuerzos de tensión. En cambio, si $\tau_U = \tau_L$, en teoría el geosintético no desarrollaría esfuerzos de tensión, lo cual se observará en los elementos que encuentran por debajo de la interfase crítica. La ecuación general para estimar T_{gs} en función al método límite es la siguiente:

$$T_{gs,i} = L [(c_{a,U} - c_{a,L}) + (\gamma h \cos \omega)(\tan \delta_U - \tan \delta_L)]$$

En general, mediante el enfoque basado en el ML se obtienen tensiones mayores a las estimadas con el MEL, como consecuencia de no asumir la contribución de la resistencia pasiva del suelo en la estabilidad. Por lo tanto, este enfoque da lugar a una sobrestimación de las cargas de tensión en los geosintéticos. Asimismo, no toma en cuenta la rigidez de los componentes de la cobertura cuando se determina la distribución de tensiones, al omitir este aspecto puede darse lugar a resultados que no son compatibles con la realidad.

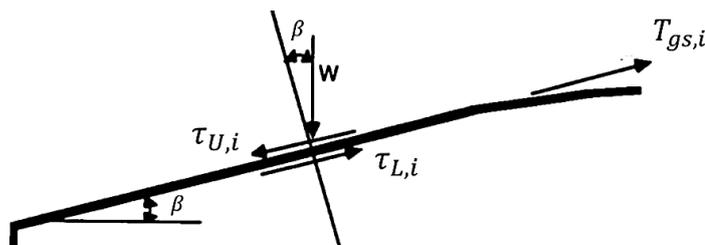


Figura 3.5 Modelo conceptual del método límite para esfuerzos de tensión y de corte en el geosintético. Adaptado de: Koerner y Hwu, 1991.

3.4.3 Enfoque basado en la columna compuesta simple (CCS)

El enfoque CCS fue propuesto por Long *et al.* (1994) para predecir las cargas de tensión en los geosintéticos en función el equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones. El modelo conceptual se basa en un sistema compuesto por columnas individuales que representan las capas de suelo y geosintéticos de la cobertura, tal como se observa en la Figura 3.6. Las asunciones principales de este enfoque son las siguientes:

- Se considera un estado de equilibrio en el que no se produce el deslizamiento en la interfase entre columnas adyacentes.
- Las columnas permanecen fijas en la base y en la cresta del talud, es decir, no hay ningún desplazamiento en ambos extremos.
- Se asume que las columnas tienen un comportamiento similar a un material elástico-plástico y se deforman en la misma magnitud en dirección axial.

- La capa suelo solo presenta rigidez axial a la compresión (K_c) y las capas de geosintéticos solo presentan rigidez axial a la tensión (K_t).
- La carga axial en los componentes de la cobertura que están por encima de la interfase crítica solo se origina cuando el esfuerzo de corte aplicado (f) es mayor a la resistencia cortante movilizada en la interfase (f_s).

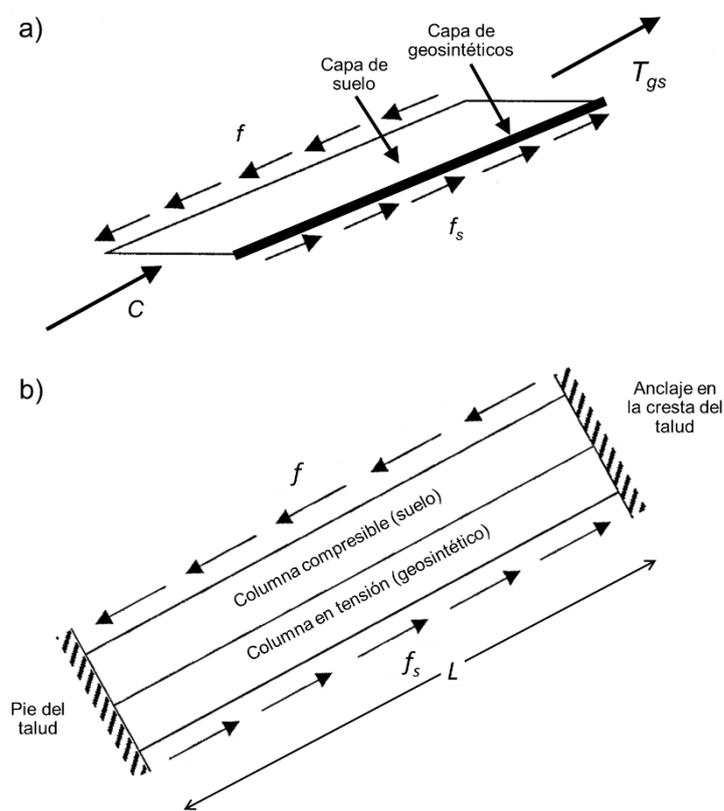


Figura 3.6 (a) Diagrama de fuerzas en la cobertura; (b) modelo conceptual de columna compuesta simple. Adaptado de: Liu, 2001.

Las fuerzas de deslizamiento sobre la cobertura (Fi) generan un esfuerzo de corte sobre la interfase crítica. La diferencia entre el esfuerzo de corte aplicado (f) y la resistencia cortante movilizada en la interfase (f_s) es un esfuerzo de corte neto (f_n) que actúa sobre la superficie de los dos componentes que generan esta interfase. Estos esfuerzos se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$f = \sum \frac{Fi}{L}$$

$$f_s = c_a + \frac{N \tan \delta}{L}$$

$$f_n = f - f_s$$

La carga axial en los componentes de la cobertura se incrementa linealmente a lo largo de la columna compuesta en proporción al esfuerzo de corte neto aplicado (f_n), desde una máxima carga de tensión en la cresta (T_{gs}) hasta una máxima carga de compresión al pie del talud (C), tal como se observa en la Figura 3.7. La longitud de los segmentos en compresión (L_C) y tensión (L_T) se obtienen en función a la rigidez axial de los componentes (K_C y K_t) e igualando los desplazamientos de los componentes en compresión y tensión en el punto de deformación axial nula. Al igualar ambos desplazamientos se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{C}{2K_C} L_C = \frac{T_{gs}}{2K_C} L_T$$

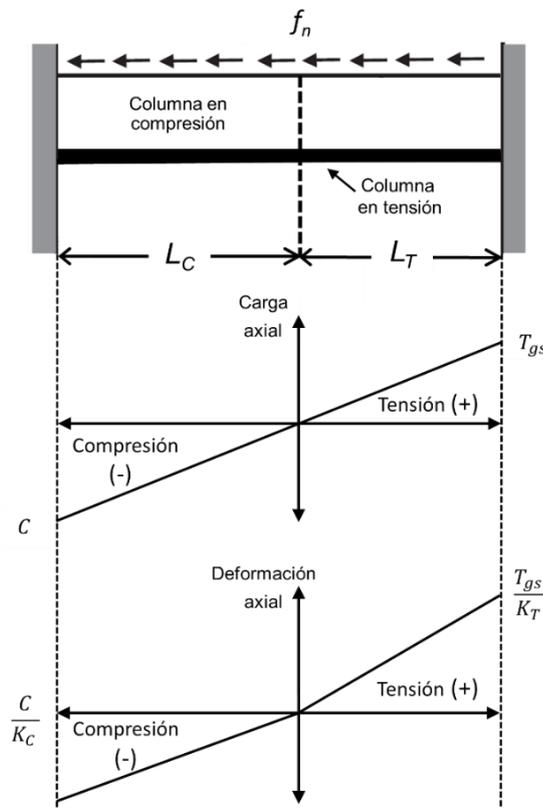


Figura 3.7 Cargas y deformaciones axiales en el modelo de columna compuesta simple con zonas en tensión y compresión.

En un sistema compuesto por varios geosintéticos, la rigidez axial de la columna en tensión (K_t) puede obtenerse a partir de la suma de rigideces axiales de todos los geosintéticos asumiendo que tienen la deformación axial:

$$K_t = \sum_{i=1}^n K_{t,i}$$

Para una condición de equilibrio, la fuerza de corte neta a lo largo de toda la cobertura ($f_n L$) es balanceada con la carga de compresión del suelo (C) y la carga de tensión en el geosintético (T_{gs}), de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$f_n L = C + T_{gs}$$

$$T_{gs} = f_n L_T$$

$$C = f_n L_C$$

La carga de tensión (T_{gs}) en la columna compuesta es obtenida en base a las ecuaciones anteriores. Asimismo, al obtener la tensión total en la columna compuesta, la carga axial en cada geosintético ($T_{gs,i}$) es distribuida proporcionalmente en función a su rigidez axial relativa ($K_{t,i}$). Este criterio ha sido verificado por Lavasan *et al.* (2016) con los resultados obtenidos en métodos de elementos finitos. En base a ello, se tienen las siguientes expresiones:

$$T_{gs} = \frac{f_n L}{1 + \sqrt{\frac{K_C}{K_T}}}$$

$$T_{gs,i} = T_{gs} \left(\frac{K_{t,i}}{K_t} \right)$$

El enfoque CCS proporciona una forma de evaluar la influencia de la rigidez axial en la carga de tensión máxima de los geosintéticos. Si el sistema presenta una rigidez a la compresión mayor que la rigidez a la tensión, entonces la resistencia pasiva del suelo recibirá la mayor parte de la carga axial. Por el contrario, si la rigidez a la tensión es mucho mayor a la rigidez a la compresión, la carga axial será transferida en mayor proporción a los geosintéticos.

3.4.4 Comparación de enfoques para la estimación de tensiones

Los criterios considerados en los enfoques descritos difieren en distintos aspectos en cuanto a los mecanismos de transferencia de cargas y el comportamiento mecánico de los componentes de la cobertura y las interfases. La Tabla 3.3 resume las diferencias principales entre estos enfoques.

Las cargas de tensión estimadas con los distintos enfoques que se han descrito presentan diferencias significativas entre sí. El método límite predice que las cargas de tensión se producen en inclinaciones de talud mayores al ángulo de fricción de la interfase crítica, mientras que el método de equilibrio límite predice que la tensión se produce cuando la resistencia pasiva del suelo es superada lo cual resulta en inclinaciones considerablemente mayores. Debido a ello, el método límite tiende a sobreestimar las cargas de tensión resultando ser excesivamente conservador, mientras que el método de equilibrio límite tiende a subestimar las cargas de tensión (Bergado *et al.*, 2006).

Tabla 3.3 Comparación de enfoques para la estimación de cargas de tensión en geosintéticos.

Formulación	Método	Asunciones principales			Distribución de las cargas de tensión en los componentes
		Comportamiento axial	Comportamiento de la interfase	Movilización de la carga axial dentro de las capas	
Equilibrio de fuerzas	MEL	Rígido plástico	Rígido plástico	Movilización de la resistencia total a lo largo de la interfase y al pie antes de desarrollarse la tensión en el geosintético	No permite conocer la distribución de cargas de tensión
	ML	No considerado	Rígido plástico	No considera la resistencia al pie del talud. Todas las fuerzas de deslizamiento son soportadas por las fuerzas de tensión y corte	Magnitud y distribución de tensiones están basados en la máxima resistencia de la interfase
Equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones	CCS	Elástico lineal con diferentes módulos de tensión y compresión	Rígido plástico	Fijado en la cresta y al pie del talud	Carga de tensión en función a la mediante la rigidez axial relativa de los componentes

Adaptado de: Long *et al.*, 1994.

Los resultados obtenidos con métodos tradicionales son muy diferentes a los obtenidos con métodos más rigurosos y no reflejan el comportamiento real de los componentes en la cobertura. No obstante, los métodos tradicionales aún vienen siendo aplicados para estimar la tensión de reforzamiento en coberturas de cierre y estructuras similares a pesar de las limitaciones que presentan, lo cual podría dar lugar a un diseño deficiente.

El método de columna compuesta simple proporciona una estimación más racional de las cargas de tensión en comparación a los otros métodos

(Bergado *et al.*, 2006). Si bien es cierto que este método asume que la resistencia en la interfase es independiente del desplazamiento, Long *et al.* (1994) sostiene que los resultados son similares a los obtenidos con métodos más rigurosos que consideran el comportamiento del esfuerzo de corte en función a la deformación.

3.4.5 Resistencia admisible en cargas de tensión

La resistencia a la tensión, también llamada tensión última (T_{ult}) o tensión de fabricación, es la tensión máxima antes de que el geosintético experimente un comportamiento plástico y es estimada mediante ensayos de laboratorio. La tensión última (T_{ult}) es reducida en el diseño para obtener una tensión admisible (T_{allow}) que sea mayor o igual a la tensión requerida para el reforzamiento (T_{reqd}). Una manera de llevar a cabo esto es aplicar factores de reducción (RF) que consideren los aspectos más importantes que afecten la resistencia del geosintético a corto y largo plazo, dependiendo del tipo de aplicación. De acuerdo con ello, la tensión admisible puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$T_{allow} = \frac{T_{ult}}{\prod RF_i}$$

Koerner (2005) recomienda factores de reducción por daños en la instalación (RF_{ID}), reducción por *creep* (RF_{CR}) y reducción por la degradación química y biológica (RF_{BD}). Por otro lado, los estándares GRI-GG4 (a) y GRI-GG4 (b) recomiendan factores de reducción dependiendo si se trata de geomallas rígidas o flexibles e incluyendo factores de reducción por nudos (RF_{JNT}) y por resistencia de uniones (RF_{JCT}).

En el presente estudio, la tensión de reforzamiento que se indica hace referencia específicamente a la tensión admisible (T_{allow}). En función a los factores de reducción específicos de cada proyecto y tipo de geosintético se deberá calcular el valor de T_{reqd} y contrastarlo con el valor de T_{ult} del geosintético de reforzamiento.

3.5 SISTEMAS DE COBERTURA CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

Los sistemas de cobertura que emplean geosintéticos con fines de impermeabilización usualmente son susceptibles a deslizamientos por tener una superficie crítica de falla en la interfase entre geosintéticos y materiales

adyacentes (ver Sección 3.1.3). Por tal motivo, en el presente estudio se ha evaluado la estabilidad física de tres tipos de sistemas de cobertura que consideran el uso de geomembrana (GM) o revestimiento geosintético de arcilla (GCL), con la misma configuración de la capa de drenaje, capa de infiltración y capa vegetal. La principal diferencia entre ellos es la conformación de la capa de revestimiento. A continuación, se describen las características de cada sistema de cobertura y las interfases con geosintéticos existentes y se mencionan casos de estudio donde el revestimiento con GM o GCL ha sido aplicado.

3.5.1 Sistema de cobertura con GM (Tipo I)

La capa de revestimiento está conformada por un suelo de baja permeabilidad sobre el cual se coloca una geomembrana, tal como se observa en la Figura 3.8 (a). El SBP conforma una capa de revestimiento secundaria que evita la filtración de agua hacia el material generador de drenaje ácido ante un posible deterioro o ruptura de la geomembrana. La barrera hidráulica conformada por ambos materiales permite contar con una capa de revestimiento más efectiva y confiable.

El sistema de cobertura con geomembrana presenta dos interfases con geosintéticos: la interfase entre la geomembrana y el suelo granular (SG) de la capa de drenaje (GM-SG) y la interfase entre la geomembrana y la capa de suelo de baja permeabilidad (GM-SBP), tal como se muestra en la Figura 3.8 (b), bajo determinadas condiciones ambas interfases pueden constituir superficies potenciales de deslizamiento afectando la estabilidad física de la cobertura.

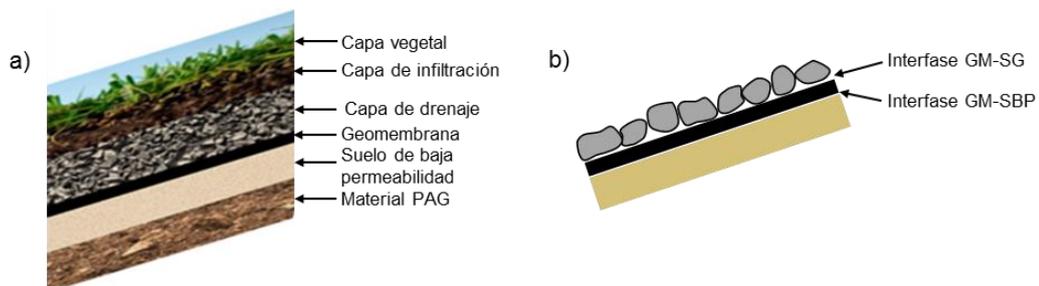


Figura 3.8 (a) Sistema de cobertura con geomembrana; (b) Interfases con geosintéticos en el sistema de cobertura Tipo I.

La mayoría de los sistemas de cobertura con geosintéticos usan geomembrana como material de impermeabilización. En Perú, este material ha sido empleado en algunos cierres de depósitos de relaves, tales de las unidades mineras Atacocha,

Casapalca, El Dorado - Barragán y Recuperada, en el depósito de desmonte de la unidad minera Rio Tinto y en el depósito de desmonte Excélsior en Cerro de Pasco. Asimismo, en otros países también ha sido empleado en el cierre del depósito de relaves de *Poirier Mine* en Quebec, Canadá (Lewis & Gallinger, 1999) y del depósito de desmonte *Scotchtown Summit* en Nueva Escocia, Canadá (Power *et al.*, 2017)

3.5.2 Sistema de cobertura con GCL (Tipo II)

La capa de revestimiento está conformada por un GCL colocado directamente sobre la superficie del depósito de residuos, tal como se observa en la Figura 3.9 (a). Las ventajas del uso del GCL se detallan en la Sección 3.1.3. En condiciones saturadas, la activación del GCL favorece la reducción de los niveles de filtración esperados debido a que su conductividad hidráulica disminuye. Asimismo, el uso de GCL es frecuente cuando no se tiene la disponibilidad suficiente de canteras de SBP y en el revestimiento de taludes con inclinaciones mayores a 2H:1V donde la compactación de la capa de SBP resulta un trabajo difícil y demanda mayores costos y medidas de seguridad.

El sistema de cobertura con GCL presenta dos interfases: entre el GCL y el suelo granular de la capa de drenaje (GCL-SG); y entre el GCL y la superficie de la subrasante (GCL-SR); tal como se muestra en la Figura 3.9 (b). La resistencia cortante de la interfase GCL-SR es muy variable ya que depende de las características específicas del material almacenado en el depósito de residuos (relave, material de desmonte o material lixiviado).

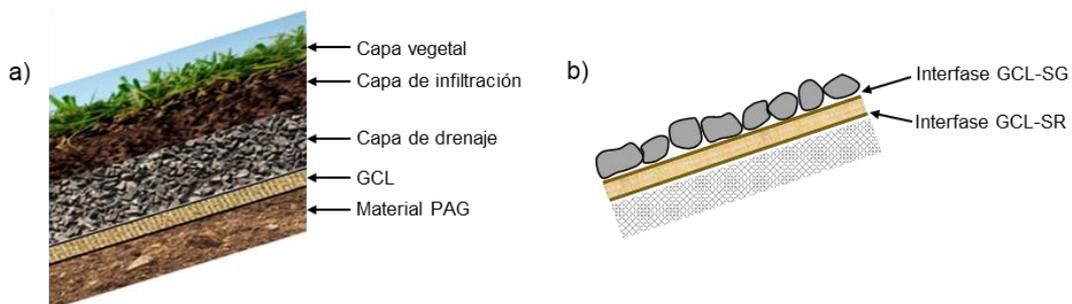


Figura 3.9 (a) Sistema de cobertura con GCL; (b) Interfases con geosintéticos en el sistema de cobertura Tipo II.

En otros países, el GCL ha sido usado en el cierre del depósito de desmonte de *Whistle Mine* en Ontario, Canadá (Asu-Wusu & Yanful, 2007), en la pila de lixiviación de Summitville Mine en Colorado, USA (Haug & Pauls, 2001) y en el

depósito de relaves de *Montague Gold Mine* en Nueva Escocia, Canadá (Hosney & Rowe, 2013).

3.5.3 Sistema de cobertura con GM y GCL (Tipo III)

La configuración de este sistema de cobertura es similar al Tipo I, no obstante, el suelo de baja permeabilidad es reemplazado por una capa de revestimiento geosintético de arcilla (GCL), tal como se observa en la Figura 3.10 (a). El GCL y la geomembrana conforman un sistema de revestimiento compuesto, donde el GCL actúa como una barrera hidráulica secundaria.

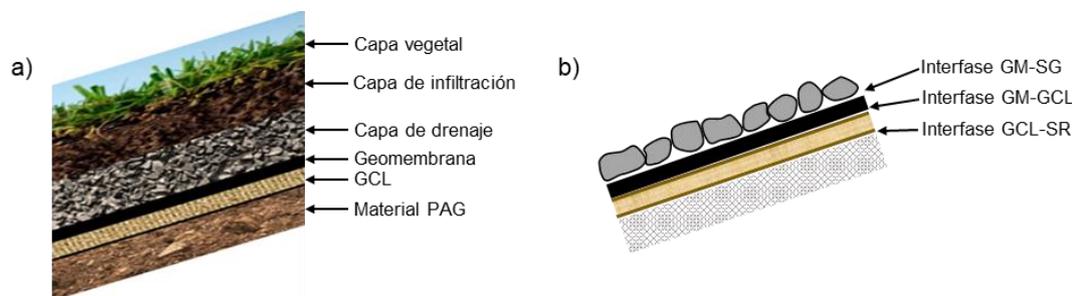


Figura 3.10 (a) Sistema de cobertura con GM y GCL; (b) Interfases con geosintéticos en el sistema de cobertura Tipo III.

Diversos autores recomiendan un revestimiento compuesto a fin de garantizar un mejor desempeño del sistema de cobertura, con ello se reduce la posibilidad de producirse un intercambio iónico (con minerales como el arsénico) o el incremento de la conductividad hidráulica del GCL por la desecación y agrietamiento de la bentonita bajo gradientes térmicos significativos (Rowe, 2014). No obstante, el uso de un revestimiento compuesto no es muy común en el cierre de componentes mineros, principalmente debido al incremento del costo por el suministro de ambos materiales. El cierre del depósito de relaves de *Montague Gold Mine* en Nueva Escocia, Canadá (Hosney y Rowe, 2013), es uno de los pocos casos de cierre con revestimiento compuesto que han sido documentados.

3.6 ESTUDIOS ANTERIORES DE RESISTENCIA CORTANTE EN INTERFASES

Diversos autores han realizado o compilado ensayos de resistencia cortante en interfases con geosintéticos, considerando rangos de esfuerzos normales desde 2 kPa hasta más de 4000 kPa (Thielmann *et al.*, 2013; Chiu y Fox, 2004; McCartney *et al.*, 2009; Sia y Dixon, 2007; Dixon *et al.*, 2006). Existen dos tipos

de fuentes de información, los cuales se basan en datos recopilados de distintos ensayos y en datos de ensayos de confiabilidad. Los ensayos de confiabilidad son realizados para investigar la variabilidad que puede ser esperada con un mismo operador, equipamiento, material (tipo de suelo o geosintético), procedimiento y condiciones de ensayo.

A continuación, se detallan los resultados de ensayos de corte directo realizados por distintos autores en las interfases GM-SG, GM-SBP, GCL-SG y GM-GCL de los sistemas de cobertura indicados en la Sección 3.5 que son parte del presente estudio. En sistemas de cobertura, el esfuerzo normal que se transfiere perpendicularmente a la superficie se encuentra en un rango entre 5 a 25 kPa aproximadamente, lo cual dependerá de la inclinación del talud, el peso específico del suelo y el espesor de la cobertura de suelo. En tal sentido, los datos que se presentan fueron seleccionados para rangos de σ_n bajos con la finalidad de que puedan ser aplicables a coberturas de cierre. Esta información solo debe ser tomada como referencia ya sea para un diseño preliminar, para contrastar la influencia de determinados factores en la resistencia cortante o con el fin de identificar rangos de valores probables máximos y mínimos.

3.6.1 Interfase GM - SG

Una de las fuentes de información más importantes que se tiene para parámetros de resistencia cortante en interfases GM - SG en cargas normales bajas son las publicaciones de Criley y Saint John (1997) y Dixon *et al.* (2006).

Criley y Saint John (1997) realizaron alrededor de 40 ensayos con GM texturada de HDPE y una capa de suelo granular, con el propósito de realizar un análisis de confiabilidad. Se empleó un aparato de corte directo con σ_n entre 5 a 700 kPa, en condiciones sumergidas y con una velocidad de desplazamiento de 1,0 mm/min.

Dixon *et al.* (2006) compilaron y complementaron la información publicada por Blumel y Stoewahse (1998) y Criley y Saint John (1997). En conjunto, se compiló alrededor de 60 ensayos realizados con σ_n entre 5 y 720 kPa. Con el propósito de contar con parámetros preliminares para el diseño de coberturas, Dixon *et al.* (2006) seleccionaron los resultados de ensayos con σ_n entre 10 a 30 kPa y propusieron valores representativos de la resistencia cortante pico para la interfase GM-SG.

La Tabla 3.4 resume los parámetros de resistencia cortante pico en interfases GM-SG obtenidos por estos autores para σ_n bajos. La similitud entre ambos se debe a que la cantidad de ensayos realizados por Criley y Saint John (1997) es mayor en el conjunto de datos.

Tabla 3.4 Parámetros de resistencia cortante pico en interfase GM-SG ($\sigma_n < 30$ kPa).

Fuente de información	Resistencia pico (σ_n entre 10 y 30 kPa)			
	Prom. (μ)		Desv. Est. (σ)	
	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)
Dixon, Jones y Fowmes (2006)	35,7	3,6	1,3	6,4
Criley y Saint John (1997)	35,7	3,6	1,5	2,0

Fuente: Dixon *et al.*, 2006.

Los valores propuestos por estos autores también pueden ser válidos para la resistencia cortante residual teniendo en cuenta que en interfases con suelos granulares no se tiene una significativa reducción de la resistencia cortante a grandes desplazamientos, similar al comportamiento de un suelo contractivo.

3.6.2 Interfase GM - SBP

Diversos autores realizaron una serie de ensayos de corte directo en interfases GM-SBP con el propósito de comparar la variabilidad e incertidumbre de los parámetros de resistencia cortante. La Tabla 3.5 resume los parámetros de resistencia cortante en interfases GM-SBP que han sido presentados en las publicaciones con mayor cantidad de ensayos, las cuales son las siguientes:

Criley y Saint John (1997) realizaron 30 ensayos con GM texturada de HDPE y una capa de suelo fino con el propósito de realizar un análisis de confiabilidad. Se empleó un aparato de corte directo a gran escala con σ_n de 7, 20 y 35 kPa, en condiciones saturadas y con una velocidad de desplazamiento de 1,0 mm/min.

Sia y Dixon (2007) realizaron 15 ensayos con GM texturada de HDPE y una capa de suelo fino (CL), con el propósito de realizar un análisis de confiabilidad. La capa de suelo fue compactada al 95 % de la MDS y los ensayos fueron realizados considerando σ_n entre 11 a 51 kPa con una velocidad de desplazamiento de 1,0 mm/min. La reducción de la resistencia pico en condiciones residuales está en el rango de 40 a 60 %.

Sia (2007) compiló más de 90 ensayos publicados en la literatura existente por autores como Dixon *et al.* (2006), Koerner y Narejo (2005) y Blumel y Stoewahse (1998). Los ensayos fueron realizados con σ_n entre 7 a 200 kPa, de los cuales 46

se realizaron con σ_n menores a 50 kPa. Los equipos, materiales empleados y condiciones de ensayo son diferentes en cada fuente, por lo cual existe una variabilidad inherente en los resultados.

La información publicada en la literatura existente no considera GM de LLDPE, PVC o VLDPE, debido a que anteriormente el uso de GM de HDPE era común en la mayoría de las aplicaciones. No obstante, el uso cada vez más frecuente de otros tipos de GM da lugar a la necesidad de realizar más ensayos para poder contrastar la resistencia cortante en interfases con estos materiales.

Tabla 3.5 Parámetros de resistencia cortante pico y residual en interfase GM – SBP ($\sigma_n < 50$ kPa).

Fuente de información	Resistencia pico				Resistencia residual			
	Prom, (μ)		Desv, Est, (σ)		Prom, (μ)		Desv, Est, (σ)	
	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)
Dixon <i>et al.</i> , (2006), Koerner y Narejo (2005) y otros,	30,7	3,4	6,4	2,7	27,0	2,0	4,3	1,9
Criley and Saint John (1997)	29,5	2,1	2,4	1,0	27,3	0,9	3,1	1,1
Sia y Dixon (2007)	22,5	4,6	2,3	0,9	11,9	1,8	1,2	0,4

Fuente: Sia, 2007.

3.6.3 Interfase GCL - SG

Estudios relacionados a la resistencia cortante en interfases GCL-SG son menos frecuentes. Garcin *et al.* (1995) y Chiu y Fox (2004) son algunos de los pocos autores que publicaron estudios de interfases entre GCL y distintos tipos de suelo. Garcin *et al.* (1995) realizaron ensayos con arenas y GCL punzonados, en rangos de σ_n entre 15 a 100 kPa, en condición seca y considerando un desplazamiento máximo de 45 mm. En la resistencia cortante pico se obtuvo una adhesión aparente nula y un ángulo de fricción de 35° en promedio. Por otro lado, Chiu y Fox (2004) realizaron 15 ensayos con GCL punzonado con agujas (compuesto por geotextiles tejidos y no tejidos) y distintos tipos de suelos (arenas, gravas y arcillas), considerando σ_n entre 2 a 43 kPa. No obstante, no se conocen las condiciones de preparación de las muestras o su clasificación SUCS. Los resultados obtenidos por estos autores se resumen en la Tabla 3.6, los cuales en todos los casos resultaron menores a la resistencia interna del GCL empleado. Se verifica que la resistencia cortante en interfases con suelos granulares (gravas y arenas) es mayor que en interfases con suelos finos (arcillas) y que la relación entre la resistencia pico y residual es mayor a 0.90 aproximadamente.

Tabla 3.6 Parámetros de resistencia cortante pico y residual en interfase GCL-SG ($\sigma_n < 50$ kPa).

Tipo de interfase		Resistencia pico		Resistencia residual	
Lado del GCL	Suelo	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)
Tejido	Grava	34,4	8,7	37,3	6,6
	Arena	36,9	5,9	37,4	5,7
	Arena arcillosa	30,9	7,2	31,8	6,0
No tejido	Grava	26,3	11,5	26,3	11,5
	Arena	35,0	10,0	35,9	6,7

Adaptado de: Chiu y Fox, 2004.

Sia y Dixon (2007) publicaron una amplia cantidad de resultados de ensayos en interfases entre geotextiles y suelos granulares. Estos resultados podrían ser aplicados en interfases con GCL en condición seca. No obstante, no podrían ser aplicados en GCL en condición saturada debido a que la resistencia cortante es menor por la extrusión de la bentonita a través del geotextil.

3.6.4 Interfase GM - GCL

McCartney *et al.* (2009) realizaron una serie de ensayos de corte directo a gran escala para evaluar la resistencia cortante entre geomembranas (GM) y revestimientos geosintéticos de arcilla (GCL). Los resultados obtenidos permitieron contrastar la influencia de distintos factores en la resistencia cortante de la interfase GM-GCL, tales como las características de la geomembrana (p.ej. el tipo de polímero y la textura), las características del GCL (p.ej. el tipo de reforzamiento interno del GCL y el uso de geotextil tejido o no tejido), las condiciones de hidratación (seca, húmeda o saturada), tipo de reforzamiento, entre otras características. Algunas de las principales conclusiones de estos autores son las siguientes:

- La resistencia cortante en interfases con GM texturada es mayor en comparación a interfases con GM lisa, independientemente de las características del GCL. Asimismo, la reducción de la resistencia pico a grandes desplazamientos en interfases con GM texturada es significativamente mayor en comparación a interfases con GM lisa.
- La resistencia cortante en interfases GM-GCL (lado de geotextil no tejido) es mayor que en interfases GM-GCL (lado de geotextil tejido), independientemente si se trata de GM lisa o texturada. Asimismo, el tipo de reforzamiento entre las caras de los geotextiles también influye en la resistencia

cortante, siendo mayor en GCL punzonado con agujas y menor en GCL cosido o sellado térmicamente.

- La flexibilidad de la geomembrana influye en la resistencia cortante en interfases GM-GCL. Se ha observado que en interfases con una GM flexible (p. ej., VLDPE, LLDPE, PVC u otras) se tiene una mayor resistencia que con una GM rígida (p. ej., HDPE), independientemente del espesor de la geomembrana.
- La resistencia cortante en la interfase GCL-GM es afectada por la hidratación de la bentonita en el GCL luego de un periodo de hidratación (t_h) en el que se produce la extrusión de este material.

La Tabla 3.7 muestra un resumen de los parámetros de resistencia cortante promedio en interfases GM-GCL, con geomembranas de HDPE y LLDPE y lados del GCL con geotextiles tejido y no tejido.

Tabla 3.7 Parámetros de resistencia cortante pico y residual en interfase GM - GCL, para σ_n bajos

GM	Interfase		Condiciones de ensayo		Parámetros de resistencia cortante			
	GCL		t_h	σ_n	Pico		Residual	
	Lado	Reforz,			α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)
HDPE-T	No tejido	np, tl	1 - 96	4,8 - 62	4,5	33,7	3,8	25,7
HDPE-S	Tejido	sb, tl	24 - 48	2,4 - 69	0,7	10,0	0,7	10,0
HDPE-T	Tejido	sb	0	2,4 - 48	1,5	27,3	1,9	20,1
		sb, tl	1 - 48	6,9 - 62	0,8	20,1	1,5	13,9
LLDPE-T	Tejido	np, tl	72	4,8 - 55,2	1,4	26,6	1,4	19,8

Adaptado de: McCartney *et al.*, 2009.

Abreviaturas:

np: punzonado con agujas.

tl: sellado térmicamente.

sb: costura con fibras.

t_h : tiempo de hidratación.

S: lado liso.

T: lado texturado.

La resistencia cortante en interfases GM-GCL generalmente presenta una reducción significativa de la resistencia pico a grandes desplazamientos. Asimismo, en función al esfuerzo normal, la envolvente de resistencia cortante es no lineal, sobre todo cuando la interfase es ensayada en condición saturada.

CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO EN SUELOS FINOS, SUELOS GRANULARES E INTERFASES

Las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de los materiales que conforman un sistema de cobertura, así como la interacción entre capas adyacentes, son variables importantes que influyen en su desempeño adecuado. Por lo tanto, la selección de los materiales a considerar en el diseño debe cumplir una serie de requisitos que permitan garantizar el funcionamiento del sistema de cobertura. En tal sentido, antes de analizar la estabilidad física en los sistemas de cobertura propuestos, es necesaria la ejecución de ensayos de laboratorio para la caracterización de las capas de suelo que están en contacto con los geosintéticos y la estimación de la resistencia cortante en las interfases entre geosintéticos y materiales adyacentes.

Teniendo en cuenta la configuración de los sistemas de cobertura considerados en el presente estudio (Sección 3.5), se ha contemplado la ejecución de ensayos de laboratorio estándares y especiales en muestras de suelo aplicables en la capa de drenaje y en la capa de suelo de baja permeabilidad. Asimismo, también se han realizado ensayos de corte directo a gran escala en las interfases entre los geosintéticos y materiales adyacentes. En el presente capítulo se describe el proceso de selección y obtención de muestras, los procedimientos, las condiciones de los ensayos y la discusión de los resultados obtenidos.

4.1 MUESTRAS DE SUELO Y GEOSINTÉTICOS

4.1.1 Muestras de suelo

Las muestras de suelo fueron obtenidas de distintos proyectos mineros en el Perú. Las muestras seleccionadas para el presente estudio corresponden a suelos granulares (arenas y gravas) y suelos de baja permeabilidad (suelos finos o con un alto contenido de finos) correspondientes a la capa de drenaje y a la capa de impermeabilización secundaria, respectivamente. El motivo por el cual solo se han considerado estos materiales, se debe a que estas capas se encuentran en contacto con el geosintético, por lo cual generan interfases críticas de deslizamiento.

La conductividad hidráulica (k) es una de las propiedades principales que se considera en el diseño de coberturas de cierre; por lo tanto, esta propiedad ha sido evaluada previamente para confinamientos bajos ($< 50 \text{ kPa}$), con el fin de verificar el uso de las muestras de suelo para el presente estudio. Con tal propósito, se ha considerado una conductividad hidráulica máxima de 10^{-5} cm/s para suelos finos y una conductividad hidráulica mínima de 10^{-2} cm/s para suelos granulares, aproximadamente.

Otros aspectos considerados durante la selección de muestras han sido garantizar que los materiales estén libres de materia orgánica y partículas friables; y que la cantidad disponible de muestras de suelo sea la suficiente para realizar los ensayos propuestos. En las Figuras 4.1 y 4.2 se observan las muestras de suelos granulares y suelos de baja permeabilidad empleados en el presente estudio.



Figura 4.1 Muestras de suelos granulares



Figura 4.2 Muestras de suelos de baja permeabilidad

4.1.2 Muestras de geosintéticos

Las muestras de geomembrana y GCL han sido seleccionadas en base a las recomendaciones indicadas en los estándares del *Geosynthetic Research Institute* (GRI) de EEUU. Durante el transporte y almacenamiento, las muestras fueron envueltas con rollos de film estirable para evitar su deterioro y exposición a la

intemperie, ya que ello podría originar cambios en sus propiedades (p. ej., reducción de la altura de aspereza en la geomembrana y disminución del contenido de bentonita en los extremos del rollo) e influir en los resultados de los ensayos de laboratorio. A continuación, se describen las características principales de las muestras de geosintéticos empleadas en el presente estudio y se indican los aspectos más importantes que motivaron su uso frente a materiales de otras características.

4.1.2.1 Geomembranas de LLDPE

La geomembrana tiene un espesor 1,5 mm en promedio, con una superficie texturada y otra completamente lisa, tal como se observa en la Figura 4.3. La altura de aspereza promedio es de 0,50 mm, la cual es mayor al valor mínimo (0,40 mm) recomendado en el estándar GRI-GM17. Una altura de aspereza de 0,50 mm es suficiente para efectos de incrementar la resistencia cortante de interfases con geomembrana en función a las características de este material. De acuerdo con Blond y Elie (2006), si la altura de aspereza es mayor a 0,50 mm la resistencia cortante de la interfase no se incrementaría significativamente. La Tabla 4.1 indica otras características adicionales de la geomembrana empleada en el presente estudio.

Tabla 4.1 Características principales de la geomembrana de LLDPE empleada en el estudio

Propiedades	Unidad	Magnitud
Espesor	mm	1.5
Altura de aspereza	mm	0.5
Densidad	g/ml	0.931
Propiedades de tensión:		
Resistencia a la ruptura	kN/m	47,4
Elongación en ruptura	%	619
Resistencia al punzonamiento	N	580
Resistencia al desgarre	N	244
Modulo secante al 2%	N/mm	< 840
Deformación de resistencia a la ruptura axi-simétrica (en LLDPE)	%	> 30
Contenido de negro de humo	%	2,5
Resistencia ultravioleta (UV)	%	> 35

La justificación del uso de geomembranas de LLDPE en lugar de HDPE en coberturas de cierre se basa principalmente en que son menos susceptibles a agrietamientos, tienen una mayor resistencia a esfuerzos multiaxiales y no necesariamente requieren de una subrasante lisa para su instalación (ver Sección 2.5.1). Asimismo, una limitación en el uso de geomembranas de HDPE es la necesidad de usar geosintéticos de protección adicionales (p. ej.,

geotextiles), ya sea en uno o ambos lados, a fin de evitar daños por esfuerzos de tensofisuración (*stress cracking*); este aspecto incrementa significativamente los costos de construcción y, en caso de no considerarse, la integridad del revestimiento podría ser afectada a corto o largo plazo. Por otro lado, en cuanto a la resistencia cortante, McCartney *et al.* (2009) sostiene que las interfases con geomembranas de materiales flexibles como el LLDPE presentan una mayor resistencia en comparación a materiales más rígidos como el HDPE, lo cual es un aspecto preponderante en la estabilidad física. Estos aspectos han sido los más relevantes para la elección de este material.

4.1.2.2 Revestimiento geosintético de arcilla (GCL)

El GCL empleado en el presente estudio está compuesto por dos geotextiles en ambas caras (tejido y no tejido), los cuales confinan un núcleo de arcilla bentonítica, tal como se observa en la Figura 4.4. El geotextil no tejido es muy importante para mantener la estabilidad dimensional del GCL en una cobertura de cierre. Si ambos lados tendrían geotextil no tejido, la bentonita se contraería de forma significativa al reducirse su humedad, lo cual daría lugar a una reducción del área del revestimiento afectando la estabilidad física y geoquímica de la cobertura, más aún teniendo en cuenta que el GCL se encuentra cerca a la intemperie y se tienen niveles de confinamientos bajos.



Figura 4.3 Muestra de geomembrana de LLDPE de 1,5 mm de espesor (lado texturado).

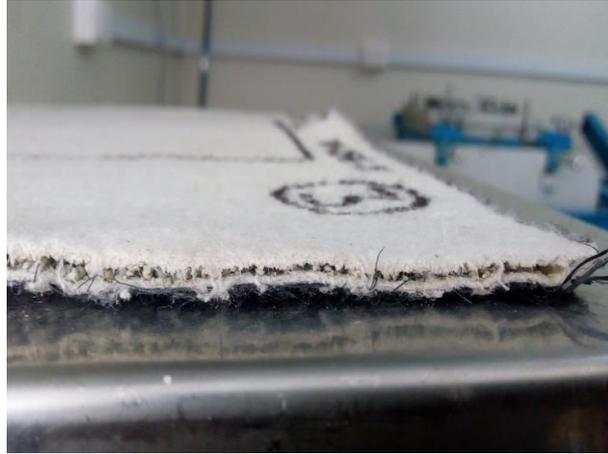


Figura 4.4 Muestra de GCL compuesto por geotextiles tejido y no tejido

La Tabla 4.2 muestra las características principales del GCL empleado en el presente estudio. Estas propiedades cumplen con las especificaciones del estándar GRI-GCL3.

Tabla 4.2 Características principales del GCL empleado en el estudio

Propiedades	Unidad	Magnitud
Capa de arcilla		
Índice de expansión	ml/2g	24
Pérdida de fluido	ml	18
Geotextil		
Masa del geotextil por unidad de área	g/m ²	200
GCL		
Masa de bentonita por unidad de área	g/m ²	3660
Resistencia a la tracción	kN/m	8.8
<i>Peel strength</i>	N/m	930
Conductividad hidráulica	cm/s	5x10 ⁻⁹
Flujo índice	m ³ /m ² /s	1x10 ⁻⁸
Resistencia cortante interna	kPa	24

La conductividad hidráulica (k) máxima de la bentonita es 5x10⁻⁹ cm/s para confinamientos bajos, menor a la obtenida en las muestras de suelo de baja permeabilidad. Asimismo, en cuanto a sus características mecánicas, el GCL empleado tiene una resistencia a la tensión de 8,8 kN/m que es mucho mayor al valor mínimo especificado en el estándar GRI-GCL3 (4,0 kN/m).

El GCL cuenta con un reforzamiento interno con punzonado y sellado térmico que mejora la unión entre sus componentes y reduce la posibilidad de migración de la bentonita. Su resistencia interna cortante es 24 kPa para un confinamiento de 10 kPa y en condiciones saturadas; esta resistencia es mucho mayor a los esfuerzos que se generan en interfases con materiales adyacentes, por lo tanto, se prevé que al ser empleado en coberturas de cierre no se produciría una falla interna por corte en el GCL.

4.2 ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en las muestras de suelo seleccionadas con el propósito de determinar sus propiedades físicas e hidráulicas a través de ensayos estándares y especiales, respectivamente. A continuación, se describen los procedimientos y condiciones consideradas en los ensayos realizados y los resultados obtenidos.

4.2.1 Ensayos estándares

4.2.1.1 Ensayos de clasificación SUCS

Los ensayos para la clasificación SUCS de las muestras de suelo incluyen el análisis granulométrico y la definición de los límites de consistencia los cuales fueron realizados de acuerdo con los procedimientos descritos en los estándares ASTM D6913 y ASTM D4318, respectivamente. La distribución granulométrica del suelo es necesaria para realizar los demás ensayos y también para el diseño de la capa de drenaje. Los resultados obtenidos de estos ensayos y la clasificación SUCS de las muestras de suelo se indican en la Tabla 4.3.

4.2.1.2 Ensayo Proctor estándar

El ensayo Proctor estándar fue realizado en las muestras de suelo de baja permeabilidad, de acuerdo con el procedimiento indicado en el estándar ASTM D698. La máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (OCH) obtenidos para cada muestra de suelo se indican en la Tabla 4.4, ambas propiedades son necesarias para la compactación de la capa de suelo en el ensayo de permeabilidad y en el ensayo de corte directo a gran escala.

Tabla 4.3 Resumen de ensayos de clasificación SUCS.

Tipo	Muestra	Clasificación SUCS	Granulometría			LL (%)	IP (%)
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)		
Suelo granular	CD-1	SP	40.9	56.9	2.1	NP	NP
	CD-2	GP	96.7	3.2	0.2	NP	NP
	CD-3	GP	69.0	26.6	4.4	NP	NP
	CD-8	GP-GC	60.	28.6	11.4	31	13
	CD-9	GC	47.3	19.2	33.5	30	14
Suelo de baja permeabilidad	SBP-1	CH	0,0	41.7	58.3	59	32
	SBP-2	CL	0,1	45.3	54.6	28	13
	SBP-3	SC	0,0	57.6	42.4	35	16
	SBP-4	CL	0,0	25.4	74.6	37	18
	SBP-6	CL	3.6	22.9	73.5	36	15

Tabla 4.4 Resumen de ensayos Proctor estándar.

Código de muestra	Clasificación SUCS	MDS (g/cm ³)	OCH (%)
SBP-1	CH	1.618	21.8
SBP-2	CL	1.993	12.4
SBP-3	SC	1.888	14.1
SBP-4	CL	1.797	17.1
SBP-6	CL	1.755	17.5

4.2.2 Ensayos especiales

4.2.2.1 Ensayo de permeabilidad de pared rígida

El ensayo de permeabilidad de pared rígida fue realizado en muestras de suelos granulares de acuerdo con el procedimiento descrito en el estándar ASTM D2434, considerando una carga hidráulica constante. El ensayo consiste en colocar la muestra de suelo en un permeámetro en capas sucesivas de igual espesor confinándola luego con dos materiales porosos en sus extremos y aplicando una carga específica. La muestra es saturada lentamente desde la parte inferior para luego permitir el paso del flujo de agua con una velocidad proporcional al gradiente hidráulico.

Las muestras de suelo fueron colocadas con una ligera compactación en un permeámetro de 12" (30,5 cm) de diámetro debido al tamaño máximo de las partículas de suelo. Previamente al ensayo, fue necesario estimar la densidad seca y gravedad específica de sólidos. Se realizó diez pruebas por cada muestra de suelo y se verificó que no se haya producido la segregación de las partículas. En la Tabla 4.5 se muestra la conductividad hidráulica promedio de cada muestra con valores corregidos para una temperatura de 20 °C. Los valores obtenidos también serían representativos para σ_n en diferentes espesores de cobertura teniendo en cuenta que la variación en k no es significativa en σ_n menores a 50 kPa. La conductividad hidráulica en las muestras de suelos granulares es mayor a 10^{-2} cm/s, con lo cual se estima que la capa de drenaje tendría una capacidad de descarga apropiada.

Tabla 4.5 Resumen de ensayos de permeabilidad de pared rígida en suelos granulares.

Tipo de suelo	Código de muestra	Clasificación SUCS	k (20°C) (cm/s)
Suelo granular	CD-1	SP	7,4 E-1
	CD-2	GP	1,1 E-0
	CD-3	GP	2,4 E-0
	CD-8	GP-GC	1,3 E-0
	CD-9	GC	7,8 E-1

Es importante indicar que el propósito del presente estudio ha sido analizar la estabilidad física de la cobertura, por lo tanto, criterios adicionales para el diseño de drenes no han sido considerados debido a que implican el análisis de las condiciones climáticas y la caracterización de las propiedades físicas e hidráulicas de todas las capas de la cobertura las cuales serán específicas para cada caso de estudio.

4.2.2.2 Ensayo de permeabilidad de pared flexible

Se realizaron ensayos de permeabilidad de pared flexible en muestras de SBP, de acuerdo con el procedimiento descrito en el estándar ASTM D5084, con una carga hidráulica constante. El ensayo consiste permitir el paso del flujo de agua a través del espécimen de ensayo monitoreando el volumen de agua hasta que la diferencia entre dos valores de k medidos consecutivamente sea mínima. Previamente a ello, se realiza la saturación (hasta que el parámetro B de Skempton sea mayor al 95 %) y consolidación (hasta verificar un cambio mínimo en su altura) del espécimen de ensayo.

Los especímenes de ensayo fueron preparados compactando capas sucesivas de suelo en un molde con un diámetro de 4" (10 cm) y una altura de 11 cm. La compactación fue realizada considerando el 95% de la MDS que se indica en la Tabla 4.4 con el fin de simular las condiciones en las que la capa de SBP es colocada en obra. Posteriormente, el ensayo fue realizado con un σ_n de 15 kPa y un gradiente hidráulico entre 2 y 10. En total, se realizaron 9 pruebas por cada muestra de suelo. En la Tabla 4.6 se indica la conductividad hidráulica promedio de cada muestra, corregida para una temperatura de 20 °C.

Tabla 4.6 Resumen de ensayos de permeabilidad de pared flexible en SBP.

Tipo de suelo	Código de muestra	Clasificación SUCS	k (20°C) (cm/s)
Suelo de baja permeabilidad	SBP-1	CH	4.5 E-7
	SBP-2	CL	1.5 E-5
	SBP-3	SC	4.3 E-6
	SBP-4	CL	6.2 E-6
	SBP-6	CL	2.1 E-6

Las muestras de suelos arcillosos tienen una conductividad hidráulica adecuada para su uso en la capa de impermeabilización secundaria del sistema de cobertura Tipo I. La muestra SBP-1 (CH) presenta la conductividad hidráulica más baja. No obstante, bajo determinadas condiciones, dicha muestra podría ser susceptible a

agrietamientos por fenómenos de desecación debido a su alta plasticidad ($IP=32$) y k podría disminuir a largo plazo, además que la interfase de cualquier geosintético con este suelo presentará una resistencia cortante muy baja. Por otro lado, se observa que la muestra SBP-3 (SC) tiene una conductividad hidráulica similar e incluso menor que algunos suelos tipo CL, por lo cual el uso de suelos granulares con una baja permeabilidad representa definitivamente una mejor alternativa frente al uso de suelos arcillosos (CH).

4.3 ENSAYOS EN INTERFASES CON GEOSINTÉTICOS

4.3.1 Ensayos de corte directo a gran escala (LSDS)

Los parámetros de resistencia cortante de cada interfase fueron estimados a partir de ensayos de corte directo a gran escala (LSDS, por sus siglas en inglés), de acuerdo con el procedimiento descrito en el estándar ASTM D5321 (ver Sección 2.6.2), considerando σ_n de 10, 30 y 50 kPa. El equipo empleado en el ensayo se observa en la Figura 4.5, el cual cuenta con contenedores para la colocación de la muestra de suelo, dispositivos de sujeción para el geosintético, indicadores de desplazamiento y dispositivos de aplicación de cargas normal y cortante.



Figura 4.5 Equipo para ensayos de corte directo a gran escala con geosintéticos
Fuente: Laboratorio Geotécnico de Anddes.

En interfases suelo-geosintético (GM-SG, GM-SBP y GCL-SG), el geosintético fue colocado sobre un substrato rígido y sujetado en uno de sus extremos. Posteriormente, se colocó el contenedor superior y la muestra de suelo. Las muestras de SBP se colocaron en capas sucesivas compactadas al 95% de la MDS, mientras que la capa de drenaje fue colocada al volteo, ello con la finalidad

de representar las condiciones en las que estas capas de suelo suelen ser colocadas en obra. En interfases geosintético-geosintético (GM-GCL, lados tejido y no tejido), el GCL fue sujetado al contenedor superior a través de una plancha de agarre. El área efectiva de contacto entre los materiales que conforman la interfase fue de 30 x 30 cm, la cual se mantuvo constante durante la ejecución de cada prueba.

Luego de colocar el contenedor superior, se aplicó una carga vertical de acuerdo con el σ_n requerido, con la finalidad de permitir la consolidación del espécimen de ensayo. En interfases GM-SG y GCL-SG, la consolidación se realizó en condición saturada, los especímenes de ensayo fueron sumergidos durante un periodo de hidratación (t_h) mínimo de 12 horas, ello debido a que estas interfases se encuentran por debajo de la capa de drenaje. En cambio, en interfases GM-SBP y GM-GCL, las pruebas fueron realizadas en condición húmeda ya que ambas interfases se encuentran por debajo de la geomembrana y la saturación del GCL o el SBP es poco probable bajo estas condiciones.

Luego de la consolidación del espécimen de ensayo, el ensayo de corte directo comenzó con el desplazamiento del contenedor superior a una velocidad constante (0,5 mm/min para interfases con GM y 0,1 mm/min para interfases con GCL) hasta alcanzar un desplazamiento de 75 mm aproximadamente. El desplazamiento horizontal y la fuerza de corte fueron registradas desde el inicio de la prueba generando así una envolvente específica para σ_n . La Tabla 4.7 presenta un resumen de los ensayos LSDS realizados en el presente estudio, indicando las condiciones de ensayo para cada tipo de interfase.

Tabla 4.7 Resumen de ensayos de corte directo a gran escala realizados por cada tipo de interfase.

Sistema de cobertura	Interfases		Condición de ensayo	Nº ensayos	Nº pruebas
	Capa superior	Capa inferior			
Tipos I y III	SG	GM	Saturada ($t_h > 12h$)	5	15
Tipo I	SBP	GM	Húmeda (95% de MDS)	5	15
Tipo II	SG	GCL (W)	Saturada ($t_h > 12h$)	5	15
Tipo III	GM	GCL (W)	Humedad natural	1	3
	GM	GCL (NW)	Humedad natural	1	3
TOTAL				17	51

En el caso de interfases con geomembrana, la medición de la altura de aspereza en la superficie texturada se realizó antes y después del ensayo empleando un

reloj comparador, de acuerdo con el estándar ASTM D5994, ello con la finalidad de evaluar la degradación de la altura de aspereza durante el ensayo.

4.3.2 Resultados obtenidos y comparación con estudios anteriores

Las envolventes de esfuerzo cortante vs. desplazamiento obtenidas en cada prueba permitieron estimar la resistencia cortante pico (τ_p) y residual (τ_r) de la interfase para esfuerzos normales de 10, 30 y 50 kPa. En base a ello, para cada conjunto de ensayos, se obtuvieron las envolventes de τ_p vs. σ_n y τ_r vs. σ_n , así como el ángulo de fricción (δ) y adhesión aparente (α) correspondientes, estos resultados se presentan en los reportes de laboratorio del Anexo C.

A continuación, se describen los resultados obtenidos en los ensayos LSDS y se contrasta la envolvente promedio con resultados de estudios anteriores que se describieron en la Sección 3.6.

4.3.2.1 Interfase GM-SG

Los parámetros de resistencia cortante obtenidos en interfases GM-SG se presentan en la Tabla 4.8. A partir de estos resultados, se verifica que la resistencia cortante promedio ($\alpha=1,5$ kPa y $\delta=18^\circ$) en esta interfase es relativamente baja en condición saturada. Asimismo, se observa que la resistencia cortante es mayor en interfases con suelos gravosos. No obstante, en interfases donde el suelo tiene un contenido de grava muy alto (GM-CD2, G=97 %), se observa que τ es menor a la obtenida en interfases donde el suelo tiene un contenido de grava menor (GM-CD3, G=69 %; y GM-CD9, G=47 %), ello puede estar asociado a la influencia de otros factores tales como la forma de las partículas de suelo (angulosa o redondeada), nivel de confinamiento o el área efectiva de contacto entre las partículas de suelo y la geomembrana, estos factores pueden resultar ser muy relevantes en interfases con suelos granulares, por lo cual una mayor cantidad de ensayos es necesaria para evaluar su influencia. Por otro lado, la resistencia más baja ha sido obtenida en la interfase GM-CD1 (SP) donde el tamaño máximo del suelo es menor y presenta un mayor contenido de arena, resultando un δ residual de 12° aproximadamente. La Figura 4.6 presenta las envolventes de σ_n vs. τ_p y σ_n vs. τ_r obtenidas en los ensayos de laboratorio y la envolvente promedio

Tabla 4.8 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfases GM-SG.

Interfase ensayada	Clasificación SUCS del suelo	Resistencia cortante pico		Resistencia cortante residual		
		α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	
Geomembrana - suelo granular	GM-CD1	SP	1,4	15,0	1,7	11,6
	GM-CD2	GP	1,6	16,6	1,8	16,5
	GM-CD3	GP	0,9	28,0	2,0	25,5
	GM-CD8	GP-GC	1,1	17,6	0,6	16,6
	GM-CD9	GC	-	21,7	-	21,9
	Promedio			1,0	19,8	1,2

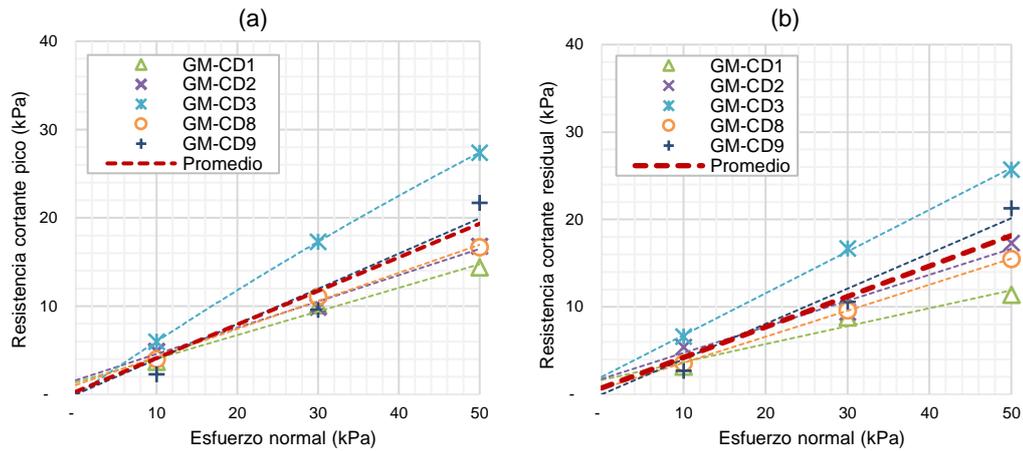


Figura 4.6 Envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfases GM-SG

La envoltente promedio de la interfase GM-SG obtenida en el presente estudio es menor a los valores obtenidos por Dixon *et al.* (2006), tal como se observa en la Figura 4.7, ello se debe a que las características de suelo en ambos casos no son iguales y existen distintos factores que podrían incluir en este resultado, tales como el tamaño y forma de las partículas de suelo, el tipo de geomembrana, contenido de humedad, entre otros.

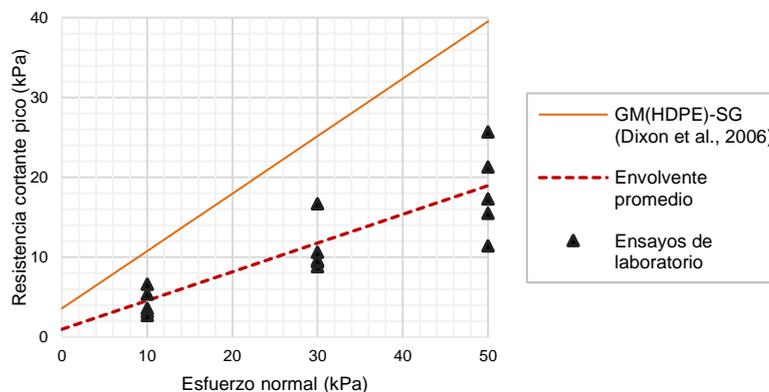


Figura 4.7 Contraste de envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico de los resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfases GM-SG

4.3.2.2 Interfase GM-SBP

Los parámetros de resistencia cortante obtenidos en interfaces GM-SBP se presentan en la Tabla 4.9. La interfase GM-SBP presenta una resistencia cortante promedio ($\alpha=2,0$ kPa y $\delta=19^\circ$) similar a la interfase GM-SG ensayada en condición saturada. No obstante, los resultados de los ensayos en la interfase GM-SBP presentan una mayor variación entre sí. Las interfaces GM-SBP3 (SC) y GM-SBP4 (CL) presentan la mayor resistencia cortante residual, con ángulos de fricción de 34° y 28° , respectivamente, mientras que las demás interfaces presentan δ cercanos a 10° . Asimismo, en el caso de la interfase GM-SBP1 (CH), si bien es cierto que τ es la más alta para σ_n igual a 10 kPa, se observa que τ es una de las bajas para σ_n de 30 y 50 kPa debido a su δ bajo.

Tabla 4.9 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfaces GM-SBP.

Interfase ensayada	Clasificación SUCS del suelo	Resistencia cortante pico		Resistencia cortante residual		
		α (kPa)	δ ($^\circ$)	α (kPa)	δ ($^\circ$)	
Geomembrana - suelo de baja permeabilidad	GM-SBP1	CH	6,3	13,9	4,4	11,9
	GM-SBP2	CL	-	14,3	-	13,7
	GM-SBP3	SC	-	39,5	-	33,8
	GM-SBP4	CL	-	42,5	2,6	28,0
	GM-SBP6	CL	1,6	18,7	2,7	9,3
	Promedio			4,4	26,0	1,9

Como era de esperarse, la interfase más favorable para la estabilidad física es la interfase GM-SBP3 (SC), debido a que presenta una resistencia cortante alta y no experimenta una reducción significativa de τ en condiciones residuales. Una mayor cantidad de ensayos es necesaria para contrastar la influencia de otros factores como el índice de plasticidad, la densidad o el contenido de finos. La Figura 4.8 presenta las envolventes de σ_n vs. τ_p y σ_n vs. τ_r obtenidas en los ensayos de laboratorio y la envolvente promedio del conjunto de ensayos.

Las envolventes promedio de τ_p y τ_r en interfaces GM-SBP obtenidas en el presente estudio se encuentran dentro del rango de resultados presentados en estudios anteriores (ver Sección 3.6.2), tal como se observa en las Figuras 4.9 (a) y (b). No obstante, se observa que τ en la interfase GM-SBP3 (SC) incluso es mayor a la que se presenta en otros estudios. En cambio, la interfase GM-SBP4 (CL) sí presenta una τ_r similar a los resultados obtenidos por Criley y Saint John (1997) y datos recopilados por Sia y Dixon (2007), mientras que los

demás ensayos presentan resultados similares a los obtenidos por Sia (2007) en interfaces de GM (HDPE) con suelos tipo CL.

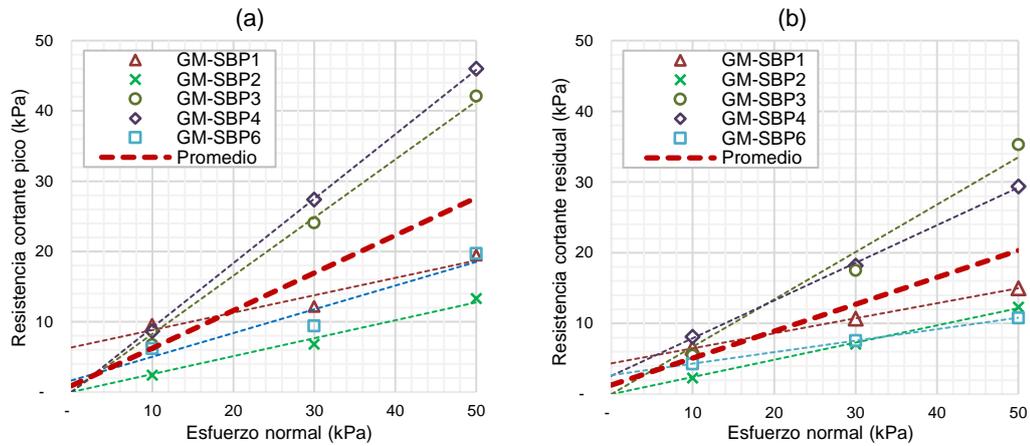


Figura 4.8 Envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfaces GM-SBP

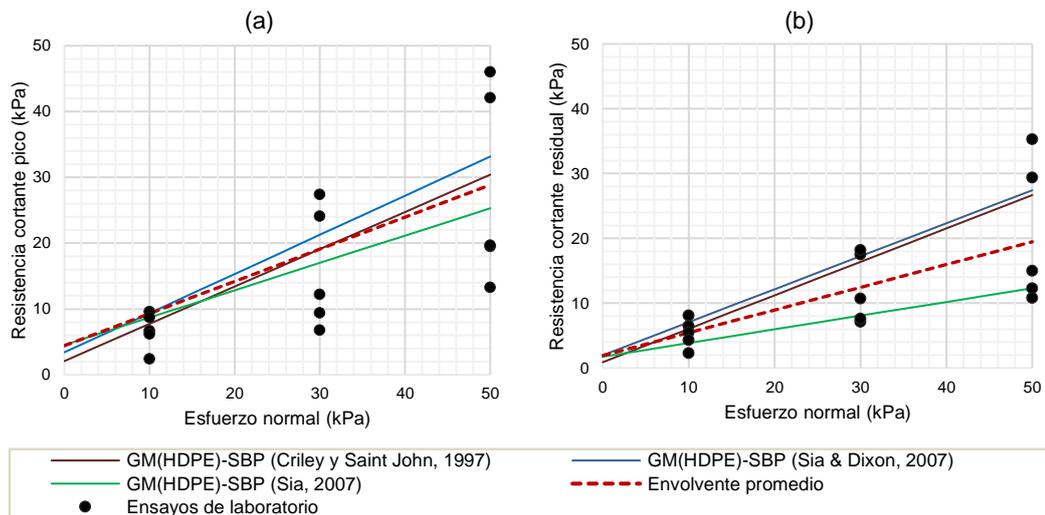


Figura 4.9 Contraste de envoltentes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y residual (b) de resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfaces GM-SBP

4.3.2.3 Interfase GCL-SG0

Los parámetros de resistencia cortante obtenidos en interfaces GCL-SG se presentan en la Tabla 4.10. La interfase GCL-SG, ensayada en el lado tejido (W) del GCL, presenta la mayor resistencia cortante promedio ($\alpha=10$ kPa y $\delta=30^\circ$) en comparación a otros tipos de interfase, ello debido a que en condición saturada la extrusión de la bentonita genera una adherencia alta entre el suelo granular y el geotextil no tejido. A medida que σ_n se incrementa, este efecto es más significativo en interfaces con suelos que tienen un mayor contenido de grava y con una presencia predominante de partículas angulosas (CD1, CD8 y CD9). En cambio,

la resistencia cortante en interfaces con arenas (CD1) es mucho menor, lo cual también sucede en interfaces con suelos gravosos con partículas sub redondeadas (CD3). La Figura 4.10 presenta las envolventes de σ_n vs. τ_p y σ_n vs. τ_r obtenidas en los ensayos de laboratorio y las envolventes promedio.

Tabla 4.10 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfaces GCL-SG.

Interfase ensayada	Resistencia cortante pico		Resistencia cortante residual	
	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)
GCL-CD1	12,1	21,3	16,3	11,7
GCL-CD2	2,7	41,8	6,1	42,3
GCL-CD3	7,4	24,7	6,5	27,4
GCL-CD8	12,8	36,2	10,5	36,5
GCL-CD9	11,0	36,4	9,2	36,7
Promedio	9,2	32,1	9,7	30,9

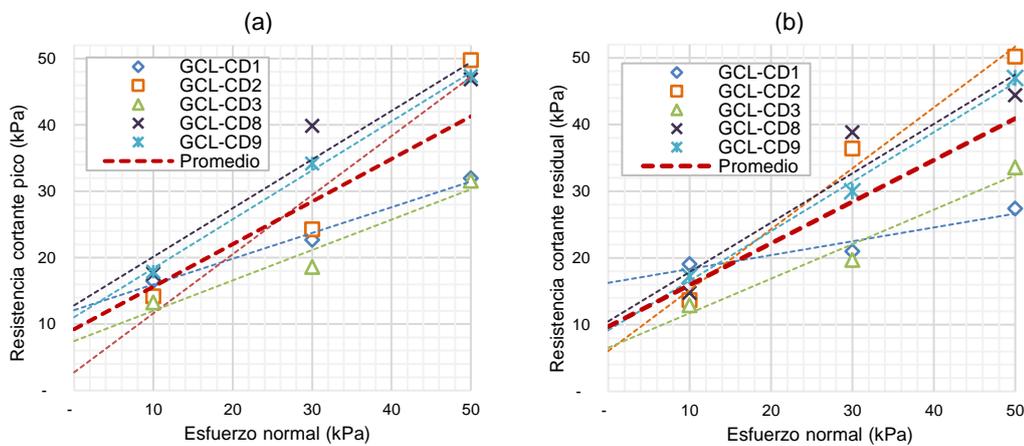


Figura 4.10 Envolventes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfaces GCL-SG.

En el caso de los ensayos con la muestra CD3, se observa que la tendencia de τ tiene un comportamiento diferente cuando la interfase es con un GCL o una GM. Si bien es cierto que la interfase GM-CD3 tiene un valor mayor de τ en comparación al obtenido en interfaces de GM con otras muestras de suelo granular, esta tendencia es diferente cuando se trata de un GCL, donde la interfase GCL-CD3 es una de las más bajas del conjunto de datos.

Las envolventes promedio de τ_p y τ_r obtenidas en el presente estudio para interfaces GCL-SG son similares a las envolventes presentadas por Chiu y Fox (2004), descritas en la Sección 3.6.3, tal como se observa en las Figuras 4.11 (a) y (b). No obstante, al ensayar interfaces de GCL con muestras de suelo diferentes, en el presente estudio se verifica una variabilidad significativa en

la resistencia cortante por diferentes mecanismos de interacción entre el suelo y el geosintético que se identificaron en los ensayos realizados.

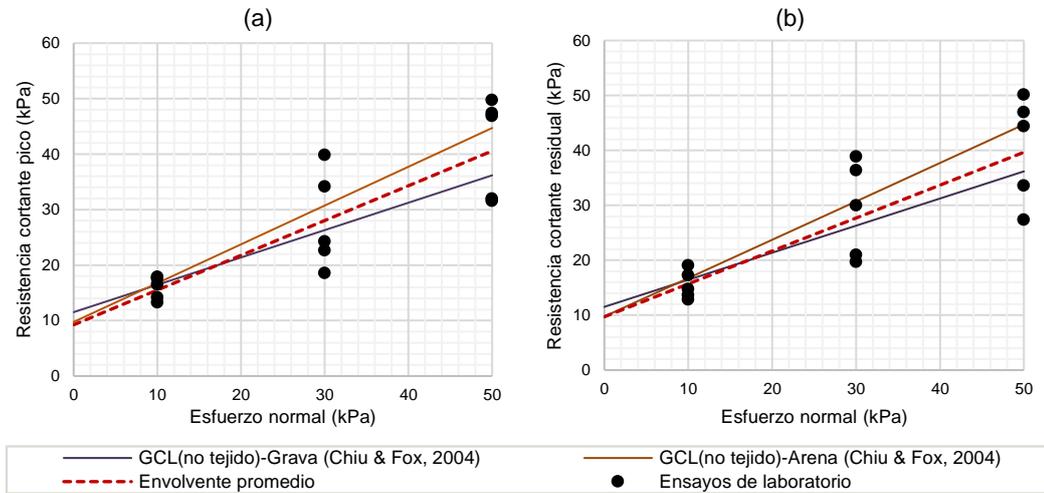


Figura 4.11 Contraste de envolventes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y residual (b) de resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfaces GCL-SG.

4.3.2.4 Interfase GM-GCL

Los parámetros de resistencia cortante en las interfaces GM-GCL (lado tejido, W) y GM-GCL (lado no tejido, NW) tienen una diferencia muy significativa entre sí, siendo esta última la que presenta la resistencia cortante más alta, tal como se observa en la Tabla 4.11. La relación entre los ángulos de fricción (δ) de ambas interfaces es incluso el triple en condiciones pico y el doble en condiciones residuales. Asimismo, se observa que la interfase GM-GCL (W) presenta una adhesión aparente prácticamente nula, lo cual reduce drásticamente la resistencia cortante, mientras que la interfase GM-GCL (NW) tiene una adhesión aparente de 4 y 3 kPa en condiciones pico y residual, respectivamente, estos valores en la adhesión son relativamente mayores en comparación a los obtenidos en interfaces entre GM-SG y GM-SBP, lo cual se debe a la adhesión generada entre las fibras del geotextil y la aspereza en la geomembrana. El contraste de las envolventes σ_n vs. τ_p y σ_n vs. τ_r obtenidas en los ensayos de laboratorio se presenta en la Figura 4.12.

Tabla 4.11 Parámetros de resistencia cortante pico y residual obtenidos en interfaces GM-GCL.

Interfase ensayada	Resistencia cortante pico		Resistencia cortante residual		
	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)	
Geomembrana - GCL	GM-GCL(W)	0,1	7,9	0,1	7,4
	GM-GCL(NW)	4,2	23,8	2,9	13,4

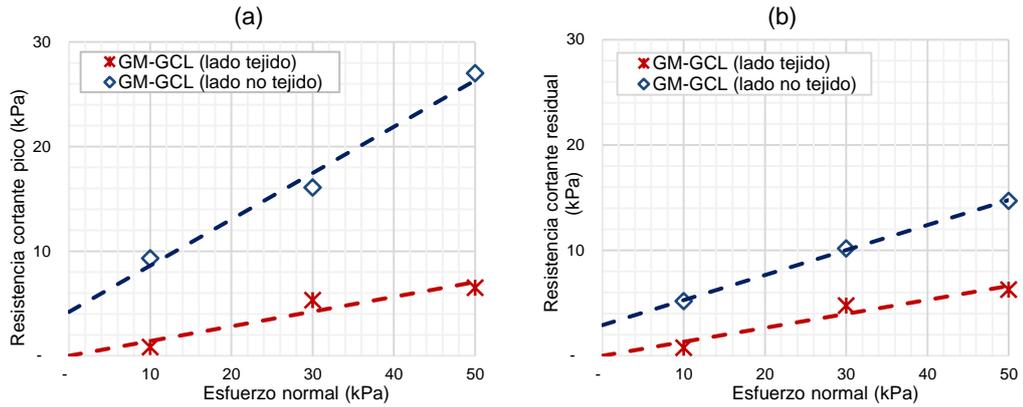


Figura 4.12 Envolventes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y resistencia cortante residual (b) en interfaces GM-GCL

McCartney *et al.* (2009) evaluó la resistencia cortante en interfaces GM-GCL con geomembranas de LLDPE y HDPE, lisas (L) y texturadas (T), y los lados de GCL con geotextil tejido (W) y no tejido (NW) (ver Sección 3.6.4). No obstante, la cantidad de ensayos con geomembranas de LLDPE es reducida y no incluye ensayos con interfaces GM(LLDPE)-GCL(NW) en σ_n bajos lo cual sí ha sido considerado en el presente estudio. El contraste entre las envolventes de τ_p y τ_r obtenidas en los ensayos LSDS y las envolventes presentadas por McCartney *et al.* (2009) se observa en las Figuras 4.13 (a) y (b). McCartney *et al.* (2009) sostienen que τ es mayor en interfaces con GM flexibles que con GM rígidas, no obstante, los resultados de los ensayos con GM (LLDPE) muestran una tendencia diferente, ello podría deberse a un comportamiento no lineal de la envolvente que originaría una mayor incertidumbre de τ en σ_n bajos.

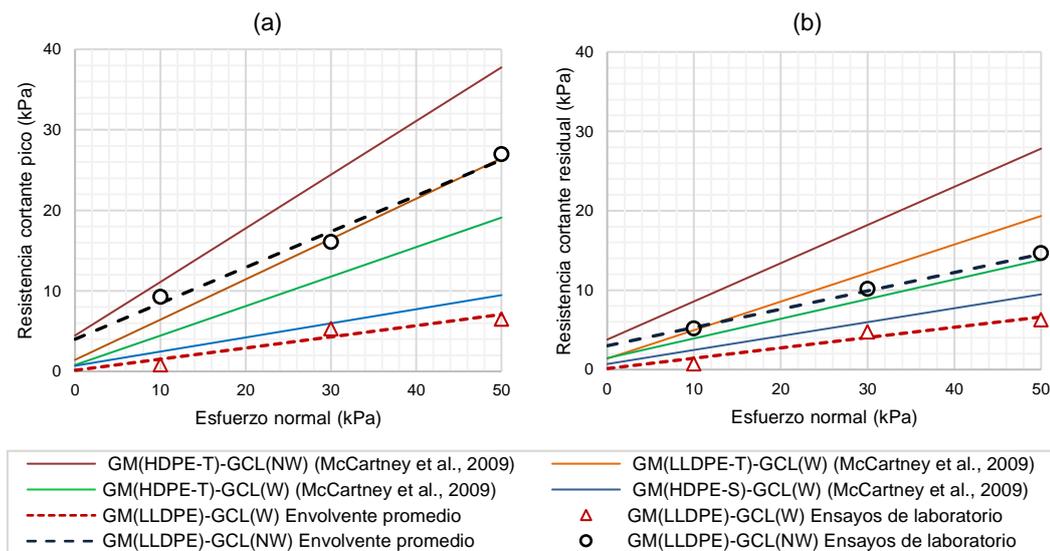


Figura 4.13 Contraste de envolventes de esfuerzo normal vs. resistencia cortante pico (a) y residual (b) de resultados de laboratorio con estudios anteriores en interfaces GM-GCL.

4.3.3 Contraste de la resistencia cortante pico y residual

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, la diferencia entre la resistencia cortante pico y residual es más significativa en interfases GM-SBP y GM-GCL(NW), tal como se observa en las Figura 4.14 (a) y (b) donde se compara las envolventes promedio σ_n vs. τ_p y σ_n vs. τ_r , respectivamente. No obstante, tal como se ha descrito en la Sección 2.6, el comportamiento de la resistencia cortante en la interfase es diferente en función al nivel de confinamiento. Por tal motivo, la reducción de la resistencia en condición residual también se ha representado a través de la relación τ_r/τ_p en función de σ_n , tal como se observa en las Figuras 4.15 (a) y (b); si esta relación es menor a la unidad, se produce una reducción de la resistencia cortante.

Los resultados muestran que la interfase GM-GCL(NW) experimenta una reducción de τ_p de aproximadamente 70 % en condiciones residuales, siendo la mayor reducción obtenida en comparación a los resultados en otros tipos de interfase. En la interfase GM-SBP, la reducción de τ_p es variable, entre 5 y 80 %, siendo menor en aquellos suelos con una presencia significativa de arena (SBP2 y SBP3) y mayor en suelos arcillosos de alta plasticidad (SBP1) o con un contenido de arena menor (SBP4 y SBP5). Por otro lado, la reducción de τ_p obtenida en interfases GM-SG, GCL-SG y GM-GCL(W) es menos significativa, se encuentra en el rango de 4 y 25 %, siendo mayor en interfases con suelos arenosos (CD1) y menor en interfases con suelos gravosos (CD2, CD3, CD4 y CD5).

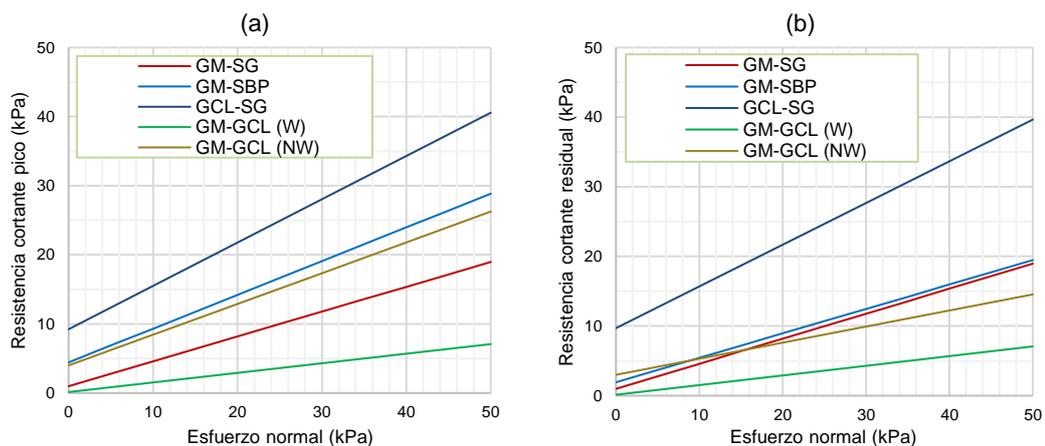


Figura 4.14 Contraste de envolventes promedio de esfuerzo normal vs. resistencia cortante en condiciones pico (a) y residual (b) en las interfases analizadas.

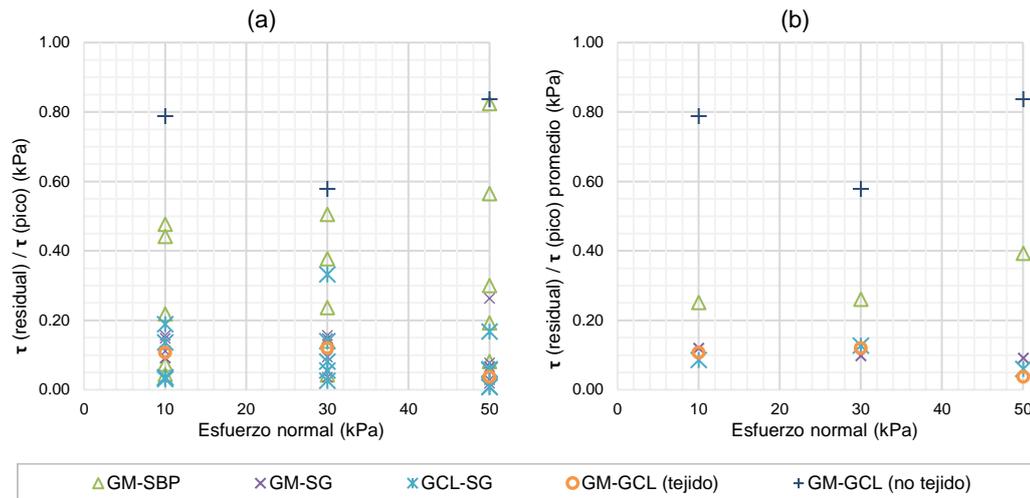


Figura 4.15 (a) Relación τ_r/τ_p obtenidas en los ensayos de corte directo; (b) Relación τ_r/τ_p promedio por tipo de interfase.

4.3.4 Contraste de la resistencia cortante en función al desplazamiento

La resistencia cortante entre dos interfases suele ser comparada a través de la envolvente σ_n vs. τ con el fin de identificar la interfase más débil cuyos parámetros de resistencia cortante (α y δ) serán empleados en el análisis de estabilidad. No obstante, estos parámetros solo representan una condición específica de la resistencia cortante en la interfase (pico o residual). Por tal motivo, otra forma de evaluar la interfase más débil de forma directa es a través de la envolvente de esfuerzo de corte vs. desplazamiento, en función al σ_n previsto. De acuerdo a ello, las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18 muestran el contraste de las envolventes τ vs. γ obtenidas en los ensayos LSDS para σ_n de 10 y 30 kPa, de acuerdo a los sistemas de cobertura considerados en el presente estudio.

4.3.4.1 Sistema de cobertura Tipo I

En el sistema de cobertura Tipo I, la ubicación de la interfase más débil es variable, puede encontrarse por encima (GM-SG) o debajo (GM-SBP) de la geomembrana, tal como se observa en la Figura 4.16. En condición pico, en la mayoría de los casos la resistencia cortante es mayor en la interfase GM-SBP, principalmente para un σ_n de 10 kPa. Sin embargo, en condición residual, esta tendencia es variable de acuerdo a la interfase analizada, independientemente de σ_n .

De acuerdo con los resultados obtenidos, la interfase más débil es muy variable y también dependerá de la condición analizada (pico o residual). En la mayoría de los análisis con interfases de GM con suelos granulares y suelos finos, suele

asumirse que la interfase GM-SBP es la interfase más débil; no obstante, de acuerdo con estos resultados se observa que dicha asunción no necesariamente resulta válida. Ello pudo haber sido originado por diversos factores, tales como la mayor altura de aspereza que exigen los estándares internacionales en geomembranas (antes 0,25 mm, ahora 0,40 mm) que incrementa la resistencia de la interfase GM(T)-SBP, originando que la interfase GM(L)-SG sea la de menor resistencia.

Por otro lado, se observa que en la interfase GM-SBP la resistencia la corte pico se alcanza en desplazamientos menores a 1,0 cm y luego se reduce significativamente hasta alcanzar un valor constante a largos desplazamientos. En cambio, en la interfase GM-SG luego de alcanzar la resistencia pico no se produce una reducción importante en la resistencia cortante y, en algunos casos, la resistencia aún se incrementa a largos desplazamientos.

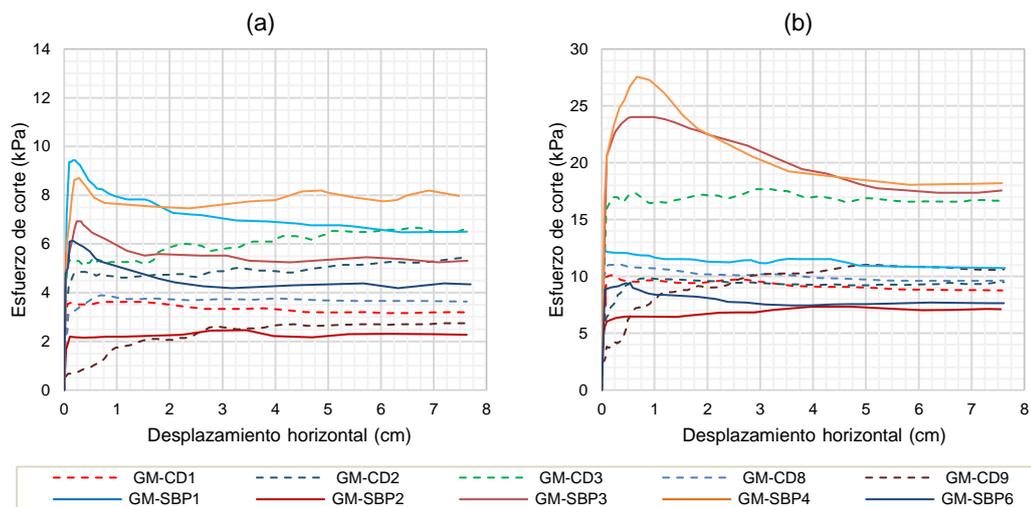


Figura 4.16 Contraste de la resistencia cortante en interfaces del sistema de cobertura Tipo I para esfuerzos normales de: (a) 10 kPa y (b) 30 kPa.

4.3.4.2 Sistema de cobertura Tipo II

En el sistema de cobertura Tipo II, se observa que a grandes desplazamientos en la mayoría de los casos no se ha alcanzado una condición donde el esfuerzo de corte permanezca constante, tal como se observa en la Figura 4.17. Asimismo, en las interfaces GCL-CD1 y GCL-CD3 se observa que la resistencia cortante aún continúa incrementándose a grandes desplazamientos, donde la resistencia cortante pico resulta igual a la resistencia cortante residual. En los demás casos,

la resistencia cortante pico se alcanza en desplazamientos entre 2,0 y 5,0 cm y, a diferencia de la interfase GM-SBP, la reducción no es drástica.

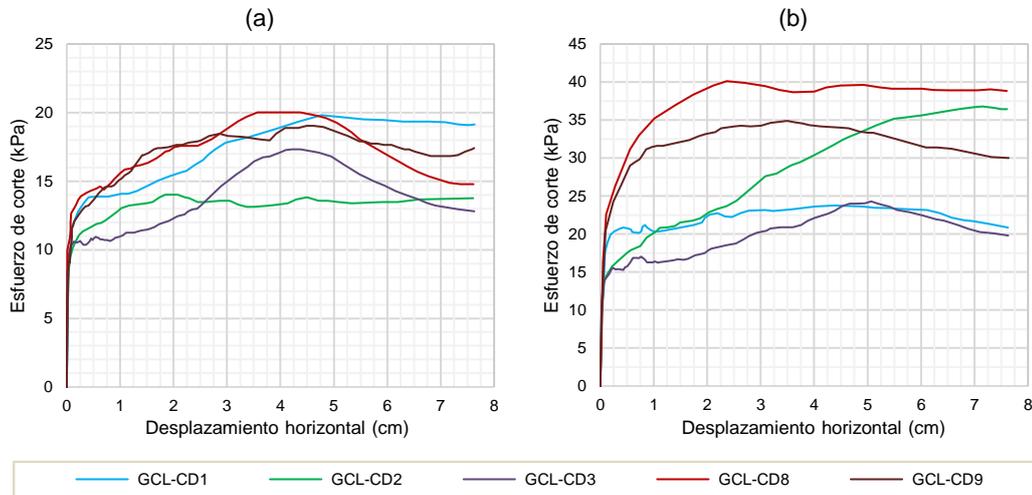


Figura 4.17 Contraste de la resistencia cortante en interfaces del sistema de cobertura Tipo II para esfuerzos normales de (a) 10 kPa y (b) 30 kPa.

La interfase más débil en este sistema de cobertura debe ser definida contrastando la interfase GCL-SG con la interfase del GCL con la subrasante (GCL-SR), cuya resistencia cortante dependerá de las características del material contenido en el depósito (relave, desmonte o material lixiviado) y el tipo de geotextil en el GCL (tejido o no tejido). En estos casos, es muy probable que la interfase GCL-SR sea la interfase más débil si el material contenido es relave y el lado del GCL es geotextil tejido.

4.3.4.3 Sistema de cobertura Tipo III

En el sistema de cobertura Tipo III, la ubicación de la interfase más débil dependerá si la interfase GM-GCL es con el lado del geotextil no tejido (NW) o tejido (W), tal como se observa en la Figura 4.18. En el primer caso, se observa que en condición pico la interfase más débil suele ser la interfase GM-SG. No obstante, en condición residual la interfase más débil es variable de acuerdo al nivel de confinamiento y la reducción post-pico que se tenga en la interfase GM-GCL(NW). Por ejemplo, la interfase GM-CD3 presenta una mayor resistencia cortante residual en comparación a la interfase GM-GCL(NW) para un σ_n de 10 y 30 kPa, mientras que, en condición pico, este último es significativamente mayor para un σ_n de 10 kPa. Asimismo, en condición residual, la interfase GM-CD9 es mayor a la interfase GM-GCL(NW) solo para un σ_n de 30 kPa. Por otro lado, en el

segundo caso, si la interfase GM-GCL es con el lado de geotextil tejido, esta interfase siempre resulta la más débil por tener una resistencia cortante muy baja.

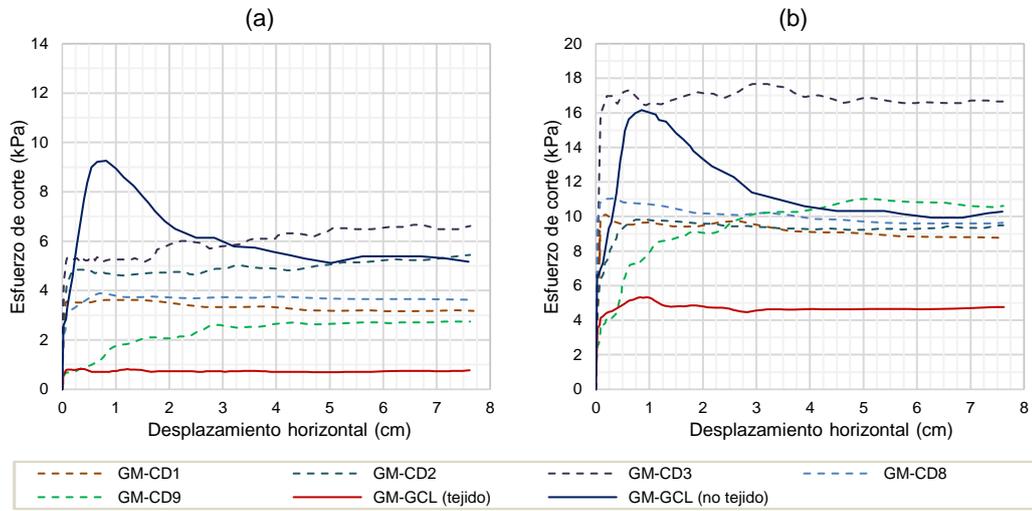


Figura 4.18 Contraste de la resistencia cortante en interfases del sistema de cobertura Tipo III para esfuerzos normales de: (a) 10 kPa y (b) 30 kPa.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE COBERTURA CON GEOSINTÉTICOS

En el presente capítulo se describe el análisis de la estabilidad física de los sistemas de cobertura contemplados en el presente estudio. El análisis fue realizado aplicando métodos basados en los enfoques determinístico y probabilístico. Previamente, se realizó un análisis paramétrico con la finalidad de conocer la influencia de cada una de las variables análisis en el análisis de estabilidad física de la cobertura, así como la interacción entre ellas. Como resultado de estos análisis, se proponen una matriz en la que se indican condiciones de estabilidad para los sistemas de cobertura evaluados y ábacos de diseño en diferentes condiciones de servicio, los cuales podrán ser aplicables en el diseño preliminar de estos componentes.

5.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS APLICADOS EN EL ESTUDIO

El desarrollo de la presente investigación ha requerido la aplicación de métodos de análisis determinísticos y probabilísticos (basados en el enfoque RBD) con el fin de realizar un análisis más riguroso de la estabilidad física de los sistemas de cobertura. Los métodos de análisis aplicados se describen a continuación:

5.1.1 Método de análisis determinístico

5.1.1.1 Método de Koshand, Fathi y Zhogui (2018)

El método propuesto por Koshand *et al.* (2018) está basado en el análisis de equilibrio límite. A diferencia de otros métodos analíticos (p. ej., Giroud *et al.*, 1995 (a) y (b); Koerner y Soong, 2005; Feng *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2016), el equilibrio de fuerzas en el sistema de cobertura es analizado incluyendo el efecto simultáneo de la carga sísmica y el flujo de agua considerando un espesor variable. Asimismo, la tensión del reforzamiento es estimada en base a la compatibilidad de deformaciones entre los elementos de la cobertura que se encuentran en tensión y compresión. El diagrama de cuerpo libre y el modelo conceptual de la columna compuesta simple en los que se basa este método se presentan en las Figuras 5.1 y 5.2, respectivamente.

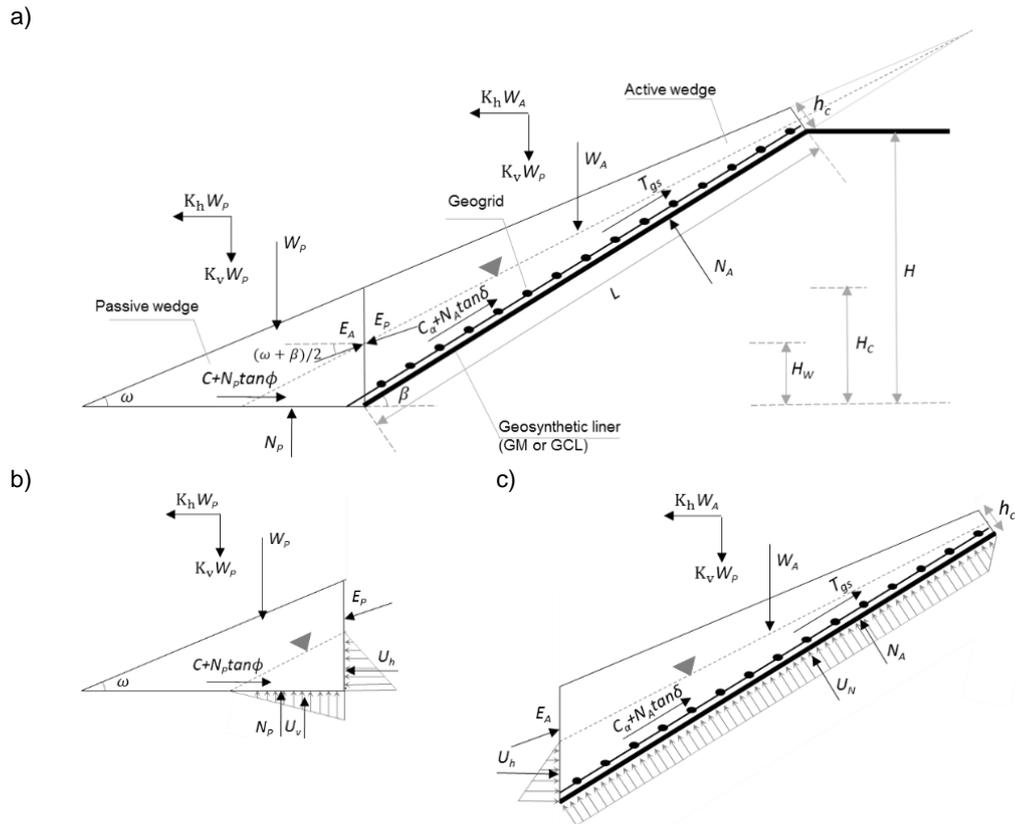


Figura 5.1 (a) Diagrama de cuerpo libre del sistema de cobertura con ancho variable; (b) cuña pasiva; (c) cuña activa.

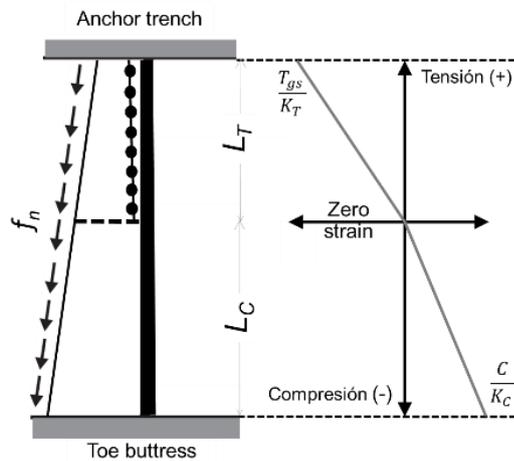


Figura 5.2 Modelo de columna compuesta con distribución de cargas axiales.

Donde:

- δ : Ángulo de fricción de la interfase ($^\circ$).
- β : Ángulo del talud de la cobertura de suelo ($^\circ$).
- ω : Ángulo de la cobertura de suelo ($^\circ$).
- C_a : Resistencia debido a la adhesión de la interfase en la cuña activa (N/m).
- C_p : Resistencia debido a la cohesión del suelo en la cuña pasiva (N/m).

- E_A, E_P : Fuerzas de empuje entre las cuñas activa y pasiva (N/m).
- FS : Factor de seguridad del sistema de cobertura.
- h_c : Espesor de la cobertura de suelo (m).
- h_w : Espesor hidráulico medido en dirección perpendicular al talud (m).
- H_w, H_c : Altura vertical de la superficie de agua medida desde el pie del talud y altura vertical de la cobertura de suelo entre las cuñas activa y pasiva (m).
- k_h, k_v : Coeficiente sísmico horizontal o vertical.
- L : Longitud de la cobertura de suelo sobre la geomembrana (m).
- N_A, N_P : Fuerza efectiva normal al plano de falla de la cuña activa o pasiva (N/m).
- T_{gs} : Fuerza de tensión en el geosintético (N/m).
- U_h : Presión de poros entre la cuña pasiva y la cuña activa (kN/m).
- U_n : Presión de poros perpendicular al talud sobre la cuña activa (kN/m).
- U_v : Presión de poros vertical sobre la cuña pasiva (kN/m).
- W_P, W_A : Peso de la cuña pasiva o activa (N/m).
- γ_w : Peso unitario del agua (N/m³).
- γ_d, γ_{sat} : Peso unitario no saturado o saturado de la cobertura de suelo (N/m³).

5.1.1.2 Criterios y asunciones principales

A continuación, se indican algunos de los criterios y asunciones principales de este método con relación a las cargas propiedades de los materiales, la influencia del flujo de agua y la carga sísmica, la estimación de tensiones en el geosintético, entre otros aspectos:

- El método asume que las propiedades de los materiales e interfases son constantes y uniformes en todo el sistema.
- La cobertura de suelo es representada como un bloque rígido de espesor variable que se ubica por encima de la interfase crítica de deslizamiento.
- La cobertura de suelo es dividida en dos partes: una cuña pasiva y una cuña activa, tal como se observa en la Figura 5.1. Las condiciones de equilibrio en ambas cuñas son evaluadas independientemente. La cuña pasiva está ubicada al pie del talud y contribuye en la estabilidad física mediante esfuerzos normales en la base y la fricción generada en el suelo a lo largo de la superficie de falla, mientras que la cuña activa se ubica en el lado inclinado de la cobertura sobre la interfase crítica de deslizamiento.

- Se asume que el deslizamiento de la cobertura se origina a lo largo de la interfase crítica ya sea por su peso propio o la acción de fuerzas externas, estas cargas son contrarrestadas principalmente por la resistencia cortante de la interfase y la tensión desarrollada en el geosintético.
- La estabilidad de la cobertura en condición sísmica es evaluada mediante el análisis pseudoestático a través de un coeficiente sísmico (k_h) que se define a partir de los criterios indicados en la Sección 3.3 y en función a las condiciones específicas de caso de estudio.
- Se asume que la altura de nivel de agua es lineal y proporcional a lo largo de toda la cobertura. La carga hidráulica (h_w) en una cobertura de espesor uniforme puede ser estimada de acuerdo con lo indicado en la Sección 3.2.1.
- La influencia del flujo de agua en la cobertura de suelo y en los esfuerzos sobre el revestimiento con geosintético detallados en la Sección 3.2.3 son considerados en el presente método.
- La tensión en la capa de geosintéticos (T_{gs}) es calculada a partir del modelo de columna compuesta simple (SCC) propuesto por Long *et al.* (1994), el cual considera la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio de fuerzas en el sistema, tal como se ha detallado en la Sección 3.4.3. La Figura 5.2 muestra el esquema del SCC adaptado para la cobertura de espesor variable propuesto por Koshand *et al.* (2018).
- La estabilidad física de la cobertura es evaluada a través de FS que representa la relación entre el esfuerzo de corte y la resistencia cortante en la interfase. El valor de FS es asumido como un valor constante a lo largo de toda la superficie de deslizamiento. Este criterio también ha sido considerado por otros autores como Koerner y Song (2005) y Feng *et al.* (2016).

5.1.1.3 Estimación de fuerzas y cálculo del factor de seguridad (FS)

a) Peso propio de la cobertura de suelo

Una de las principales cargas que afectan la estabilidad física del sistema de cobertura es el peso propio del suelo. El peso de la cuña activa (W_A) y la cuña pasiva (W_P) dependen la relación de sumersión paralela (PSR, *parallel*

submergence ratio) que representa la relación entre el espesor hidráulico y el espesor de la cobertura de suelo en la cresta (h_c, h_w) y al pie del talud (H_c, H_w), y delimita la zona saturada de la zona no saturada. Las expresiones para calcular del peso de la cobertura son las siguientes:

$$PSR = \frac{H_w}{H_c} = \frac{h_w}{h_c}$$

$$H_c = (L + h_c \tan \beta)(\sin \beta - \cos \beta \tan \omega) + \frac{h_c}{\cos \beta}$$

$$W_A = \gamma_d \left[\frac{1 - PSR}{2} \right] \left[\frac{1}{2} H_c^2 \sin 2\beta (1 + PSR) + (H_c \cos \beta + h_c)(L - H_c \sin \beta (1 + PSR)) \right] \\ + \gamma_{sat} \left[\frac{1}{4} H_c^2 PSR^2 \sin 2\beta + \frac{PSR}{2} (H_c \cos \beta + h_c)(L - H_c PSR \sin \beta) \right]$$

$$W_P = \gamma_d \left(\frac{H_c^2}{2 \tan \omega} - \frac{H_c^2 PSR^2}{2 \tan \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right)} \right) + \gamma_{sat} \frac{H_c^2 PSR^2}{2 \tan \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right)}$$

b) Fuerzas de presión de poros

La presión de poros en el sistema de cobertura está en función del espesor de flujo en la cobertura, de acuerdo con lo descrito en la Sección 3.2. La carga hidráulica en la capa de drenaje, definida en función de PSR , origina una fuerza de presión de poros normal (U_n) en la cuña activa y una fuerza de presión de poros vertical (U_v) en la cuña pasiva. Asimismo, entre la cuña pasiva y la cuña activa actúa una fuerza de presión de poros en dirección horizontal (U_h). Estas fuerzas se calculan con las siguientes expresiones:

$$U_n = \gamma_w PSR \left[\frac{(H_c \cos^2 \beta + h_c \cos \beta)(L)}{2} - \frac{h_c H_c PSR \sin 2\beta}{4} \right]$$

$$U_h = \frac{\gamma_w PSR^2 H_c^2 \cos^2 \beta}{2}$$

$$U_v = U_h \cot \beta$$

La expresión para el cálculo de U_n es válida cuando la superficie de falla se encuentra por encima de la capa de revestimiento (p. ej., en interfases GM-SG o

GCL-SG). No obstante, cuando la superficie de falla se encuentra por debajo del revestimiento (p. ej., en interfases GM-SBP o GM-GCL) no se generan presión de poros y, por lo tanto, U_n es nula, siempre y cuando no existan daños en la geomembrana.

c) Fuerzas de resistencia cortante en el plano de deslizamiento

La fuerza de resistencia cortante a lo largo de la superficie de falla es la principal fuerza que contribuye en la estabilidad física de la cobertura, la cual será diferente en la cuña pasiva (S_p) y en la cuña activa (S_A). En el presente método, ambas cargas son afectadas por el factor de seguridad, si $FS > 1$, la resistencia cortante es mayor a la requerida por el sistema para alcanzar el equilibrio y viceversa.

En la cuña activa, la superficie de falla tiene lugar en la interfase suelo-geosintético o en la interfase entre dos geosintéticos. Por lo tanto, la fuerza de resistencia cortante (S_A) se calcula a partir de la adhesión aparente (α) y el ángulo de fricción (δ) de la interfase crítica (ver Sección 4.3), de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$C_\alpha = \alpha L$$

$$S_A = \frac{C_\alpha + N_A \tan \delta}{FS}$$

Por otro lado, en la cuña activa, la superficie de falla tiene lugar en el contacto entre la base y la cobertura de suelo, por lo cual S_p depende principalmente de las propiedades de resistencia cortante del suelo (ϕ y c_p) y se calcula de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$S_p = \frac{C_p + N_p \tan \phi}{FS}$$

$$C_p = c_p \left(\frac{H_c}{\tan \omega} \right)$$

d) Fuerzas normales al plano de deslizamiento

El peso propio, la presión de poros y otras cargas externas originan que la superficie de apoyo reaccione con una fuerza normal sobre la cobertura, con una magnitud similar a la fuerza resultante, pero en dirección opuesta. De acuerdo con

el diagrama de cuerpo libre que se presenta en la Figura 5.1, las fuerzas normales que actúan sobre la cuña pasiva (N_P) y activa (N_A) se determinan con el equilibrio de fuerzas en las direcciones vertical y perpendicular, respectivamente, y se calculan con lo cual se obtienen las siguientes expresiones:

$$N_A = (U_h - K_h W_A) \operatorname{sen} \beta - U_n + (W_A + K_v W_A) \operatorname{cos} \beta + E_A \operatorname{sen} \left(\frac{\beta - \omega}{2} \right)$$

$$N_P = W_P + K_v W_P - U_v + E_P \operatorname{sen} \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right)$$

e) *Fuerzas de tensión en geosintéticos*

La tensión en los geosintéticos (T_{gs}) depende del módulo de rigidez a la compresión del suelo y el módulo de rigidez a la tensión de los geosintéticos que se encuentran por encima de la interfase crítica, tal como se ha descrito en la Sección 3.4.3. La expresión general para el cálculo de T_{gs} es:

$$T_{gs} = \frac{f_n L}{1 + \sqrt{K_C/K_T}}$$

La fuerza de corte neta a lo largo de toda la cobertura ($f_n L$) es la diferencia entre la fuerza de deslizamiento resultante (F) y la fuerza de resistencia cortante movilizada en la interfase (S_A). Las fuerzas de deslizamiento generalmente son el peso propio la carga originada por el movimiento sísmico. Por lo tanto, T_{gs} se calcula con las siguientes expresiones:

$$F = k_h W \operatorname{cos} \beta + (1 + k_v) W \operatorname{sen} \beta$$

$$T_{gs} = \frac{F - S_A}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} = \frac{1}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} (k_h W \operatorname{cos} \beta + (1 + k_v) W \operatorname{sen} \beta - \frac{C_\alpha + N_A \tan \delta}{FS})$$

Asimismo, las longitudes de la cobertura en tensión (L_T) y compresión (L_C) se estiman con las siguientes expresiones:

$$L_T = \frac{L}{1 + \sqrt{K_C/K_T}}$$

$$L_C = L - L_T$$

f) *Empujes activo y pasivo en cuñas*

Las fuerzas de empuje pasivo (E_P) y empuje activo (E_A) se obtienen a partir del equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal y vertical de la cuña pasiva y cuña activa, respectivamente. En base a ello, E_P y E_A se calculan con las siguientes expresiones:

$$E_P = \frac{[C_p + (W_p + k_v W_p - U_v) \tan \phi] - FS [K_h W_p + U_h]}{FS \left[\cos \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right) \right] - \left[\sin \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right) \tan \phi \right]}$$

$$E_A = \frac{\left[FS \left[W_A + k_v W_A - ((U_h - K_h W_A) \sin \beta + (1 + k_v) W_A \cos \beta) \cos \beta - \frac{F \sin \beta}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} \right] - \left[\sin \beta \left[1 - \frac{1}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} \right] [C_\alpha + ((U_h - K_h W_A) \sin \beta - U_N + (1 + k_v) W_A \cos \beta) \tan \delta] \right] \right]}{FS \left[\sin \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right) + \cos \beta \sin \left(\frac{\beta - \omega}{2} \right) \right] + \left[1 - \frac{1}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} \right] \left[\sin \beta \tan \delta \sin \left(\frac{\beta - \omega}{2} \right) \right]}$$

g) *Equilibrio de fuerzas y obtención de FS*

El equilibrio de fuerzas en el sistema se cumple cuando el empuje entre ambas cuñas es igual ($E_P = E_A$). En base a ello, mediante un cambio de variables, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{A(FS) - B}{C(FS) + D} = \frac{E - F(FS)}{H(FS) - G}$$

Donde:

$$A = W_A + k_v W_A - ((U_h - K_h W_A) \sin \beta + (1 + k_v) W_A \cos \beta) \cos \beta - \frac{F \sin \beta}{1 + \sqrt{K_C/K_T}}$$

$$B = \left[1 - \frac{1}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} \right] \sin \beta [C_\alpha + ((U_h - K_h W_A) \sin \beta - U_N + (1 + k_v) W_A \cos \beta) \tan \delta]$$

$$C = \sin \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right) + \sin \left(\frac{\beta - \omega}{2} \right) \cos \beta$$

$$D = \left[1 - \frac{1}{1 + \sqrt{K_C/K_T}} \right] \left[\sin \beta \tan \delta \sin \left(\frac{\beta - \omega}{2} \right) \right]$$

$$E = C_p + (W_p + K_v W_p - U_v) \tan \phi$$

$$F = K_h W_p + U_h$$

$$G = \text{sen} \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right) \tan \phi$$

$$H = \text{cos} \left(\frac{\beta + \omega}{2} \right)$$

Al despejar FS de la expresión anterior, se obtiene la siguiente ecuación cuadrática:

$$aFS^2 + bFS + c = 0$$

Donde:

$$a = AH + CF$$

$$b = FD - (BH + AG + EC)$$

$$c = BG - ED$$

Finalmente, el valor de FS se calcula con la siguiente expresión:

$$FS = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

En coberturas de espesor constante, FS puede obtenerse directamente. Sin embargo, en una cobertura de espesor variable ($\beta \neq \omega$), el cálculo de FS a menudo requiere la aplicación de procedimientos de cálculo iterativos al tratarse de una función implícita, debido a que N_A está en función de E_A y esta variable a su vez depende de FS .

5.1.2 Método de análisis probabilístico (basado en el enfoque RBD)

A diferencia del método determinístico descrito en el apartado anterior, los métodos de análisis probabilísticos basados en la teoría de confiabilidad evalúan el desempeño de una estructura a partir de la probabilidad de falla (P_f) o el índice de confiabilidad (β_i), tal como se ha descrito detalladamente en la Sección 2.7.2.

Estos parámetros se obtienen realizando simulaciones o aplicando métodos numéricos a partir de un modelo analítico específico. Asimismo, su uso permite evaluar el desempeño de la estructura con un enfoque de riesgo.

La aplicación del enfoque RBD en el presente estudio se ha realizado en base a la secuencia de etapas que se describen en la Figura 5.3. Esta secuencia fue definida en base a la revisión de estudios anteriores donde se ha aplicado el enfoque RBD para la evaluación de FS en el diseño de otras estructuras geotécnicas (Duncan, 2000).

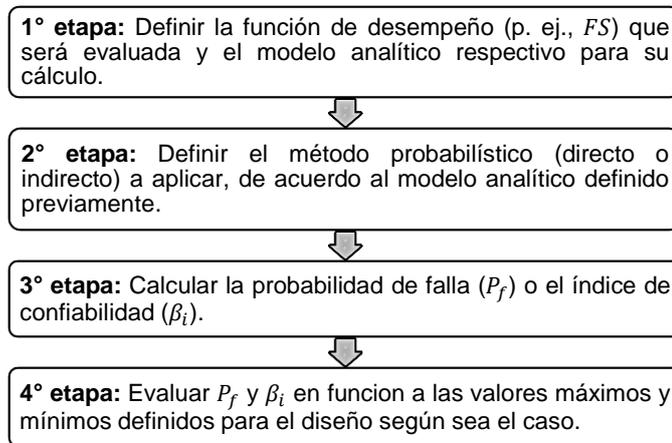


Figura 5.3 Etapas del análisis basado en la teoría de confiabilidad.

El método probabilístico aplicado en el presente estudio para la obtención de P_f y β_i fue el método de simulación de Monte Carlo (MSMC). Las características principales y algunos aspectos complementarios para la aplicación de este método son las siguientes:

- El MSMC es un método probabilístico directo y flexible que genera una distribución de probabilidad propia de la función de desempeño. La distribución de probabilidad es generada a partir de múltiples simulaciones mediante una selección aleatoria de los valores de las variables de análisis (x_i) que se obtienen a partir de distribuciones de probabilidad previamente definidas. Estas distribuciones representan la incertidumbre y variabilidad inherentes en las variables de análisis.
- Los valores aleatorios de las variables de análisis (x_i) son obtenidos analíticamente a partir de la función de distribución inversa:

$$x_i = F^{-1}(u)$$

Donde: $F^{-1}(u)$ es la inversa de la función de distribución de probabilidad $F(x)$ que es obtenida de la función de densidad $f(x)$, la cual es específica para cada variable aleatoria y el tipo de distribución correspondiente:

$$u = F(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} f(x)dx, \quad u \in [0,1]$$

El conjunto de valores de u es generado mediante algoritmos de muestreo pseudoaleatorios, donde la distribución de probabilidad de u es uniforme, por lo tanto, todos los valores de u tienen la misma probabilidad de ocurrencia.

- El MSMC es aplicable a cualquier tipo de función, por lo cual permite resolver desde problemas sencillos hasta problemas muy complejos. Asimismo, el MSMC permite considerar la interacción entre las variables de análisis en la función de desempeño, en cambio, otros métodos probabilísticos consideran la influencia de la variabilidad de cada parámetro de análisis de forma independiente.
- La precisión de los resultados del MSMC depende de la cantidad de simulaciones realizadas (N) y se define en base al nivel de confianza esperado.
- Las aplicaciones del MSMC en la evaluación de FS usualmente consideran un valor igual a 1,0 como la función de estado límite. A partir de ello, la probabilidad de falla (P_f) se calcula directamente a partir de todos los escenarios posibles donde $FS < 1,0$, de acuerdo con lo siguiente:

$$P_f = P (FS < 1) = \frac{N_1}{N}$$

Donde: N_1 representa la cantidad de escenarios en los cuales FS es menor a 1,0 y N es la cantidad total de escenarios considerados en la simulación.

- El cálculo del índice de confiabilidad depende del tipo de distribución de probabilidad obtenida para FS , para ello deben aplicarse las expresiones que se presentaron en la Sección 2.7.2, según sea el caso. La verificación del tipo de distribución representativa puede realizarse con las pruebas de bondad de ajuste de Pearson, Shapiro-Francia, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling,

siendo esta última la más eficiente para distribuciones normales simétricas (Echeverri *et al.*, 2015).

En la Figura 5.4, se presenta el diagrama de flujo de la aplicación del MSMC en la evaluación del factor de seguridad, el cual fue considerado para el análisis probabilístico realizado en el presente estudio.

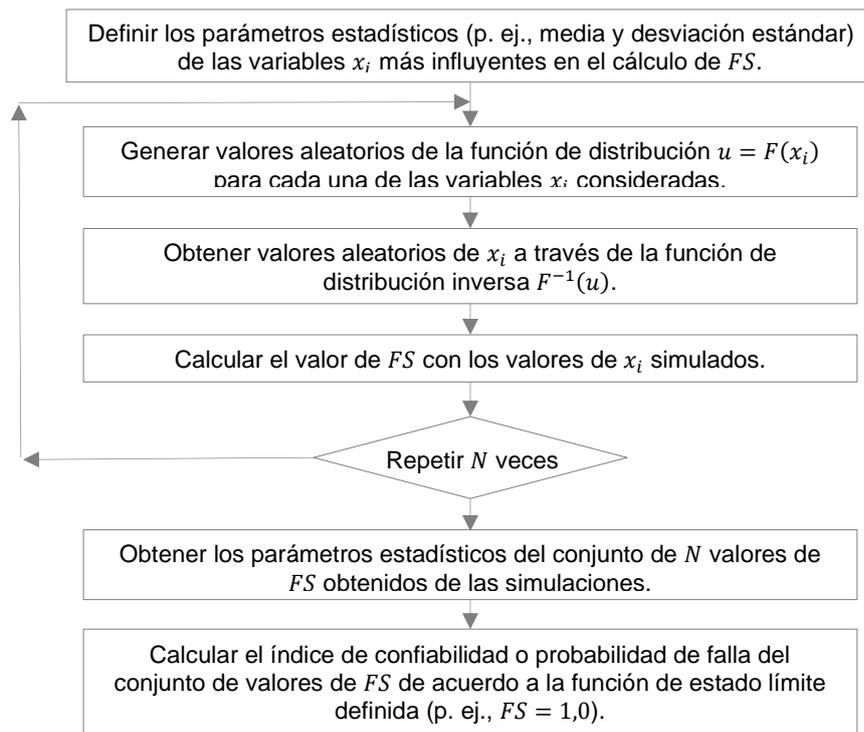


Figura 5.4 Diagrama de flujo del método de simulación de Monte Carlo aplicado a la evaluación del factor de seguridad.

5.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El análisis paramétrico ha sido realizado con el propósito de evaluar la influencia de los parámetros de diseño en la estabilidad física del sistema de cobertura. El procedimiento básicamente consiste en realizar múltiples análisis de estabilidad, considerando distintos valores dentro del dominio del parámetro a ser evaluado y manteniendo constantes los demás parámetros.

Los análisis de estabilidad se han realizado con el método analítico propuesto por Koshand *et al.* (2018), descrito en la Sección 5.1.1, tomando como referencia un caso base y asumiendo que la interfase crítica se encuentra por encima del revestimiento. La Tabla 5.1 muestra el caso base y el dominio considerado para

cada variable de análisis. Se han considerado diferentes dimensiones de cobertura, superficies de cierre y condiciones de servicio.

Las inclinaciones del talud corresponden a un rango usual en depósitos de desmonte, pilas de lixiviación y depósitos de relaves (ver Sección 2.4). Asimismo, los rangos para los parámetros de resistencia cortante en interfases han sido definidos en base a los valores máximos y mínimos obtenidos en los ensayos LSDS realizados en el presente estudio (ver Sección 4.3.2).

En la resistencia cortante del suelo, se ha considerado una cohesión nula teniendo en cuenta que las capas de suelo de la cobertura están conformadas principalmente son suelos granulares (ver Sección 3.1.1). Por otro lado, el valor máximo en la rigidez axial a la tensión (K_T) se ha definido mediante la revisión de fichas técnicas de geomallas de alta resistencia, evaluando la tensión última (T_{ult}) y el nivel de deformación axial correspondiente.

Tabla 5.1 Variables consideradas en el análisis paramétrico.

Variable de análisis	Símbolo	Unidad	Rango de valores	Caso base
Resistencia cortante de la interfase				
Adhesión	α	kPa	0 - 10	2,0
Ángulo de fricción	δ	(°)	5 - 40	24
Propiedades del suelo de la cobertura				
Peso específico no saturado	γ_d	kN/m ³	15 - 22	18
Peso específico saturado	γ_{sat}	kN/m ³	16 - 23	20
Cohesión	c_p	kPa	-	-
Ángulo de fricción	φ	(°)	20 - 34	30
Características geométricas				
Espesor	h_c	m	0,3 - 1,5	0,6
Altura	H	m	5 - 50	10
Talud de superficie	$H:V$	-	1,5H:1V - 3,5H:1V	2,5H:1V
Condiciones de servicio				
Nivel de carga hidráulica	$h:h_w$	-	0,0 - 1,0	0,5
Coefficiente sísmico horizontal	k_h	-	0 - 0,25	0,1
Variables asociadas al cálculo de tensión en geosintéticos				
Rigidez axial en tensión	K_T	kN/m	0 - 2500	-
Rigidez axial en compresión	K_C	kN/m	100 - 2500	-
Tensión	T_{gs}	kN/m	0 - 150	-

Los resultados obtenidos en el análisis paramétrico fueron graficados en curvas de tendencia del factor de seguridad versus cada variable que ha sido analizada. Las curvas de tendencia han sido graficadas contrastando los resultados obtenidos en múltiples escenarios con diferentes inclinaciones de talud, alturas, espesores, rigideces axiales, etc.

5.2.1 Influencia de las condiciones de servicio

La influencia del coeficiente sísmico (k_h) y el nivel de carga hidráulica (h/h_w) en FS se observa en las Figuras 5.5 y 5.6, respectivamente. En el primer caso solo se ha considerado la influencia del componente horizontal del sismo. No se ha considerado el componente vertical debido a que, de acuerdo con distintos autores (p. ej., Ling y Leshchinsky, 1997; Matasovic *et al.*, 1998), su impacto en la estabilidad física de la cobertura es despreciable.

A partir de los resultados obtenidos, se verifica que el incremento de k_h origina una disminución drástica de FS , debido a que los componentes de la carga sísmica incrementan la fuerza de deslizamiento resultante (F) y reducen los esfuerzos efectivos normales, por ello la carga sísmica es considerada como el factor principal que afecta la estabilidad física de la cobertura. Asimismo, se verifica que la reducción de FS es más significativa en taludes extendidos que en taludes empinados, esta reducción puede ser incluso mayor al 50 % del factor de seguridad calculado en condición estática ($k_h = 0$).

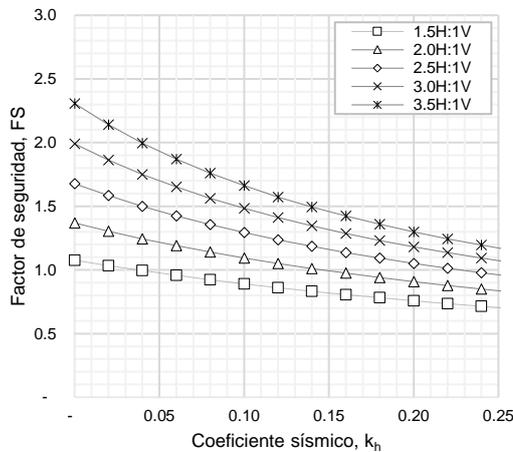


Figura 5.5 Influencia del coeficiente sísmico en el valor de FS .

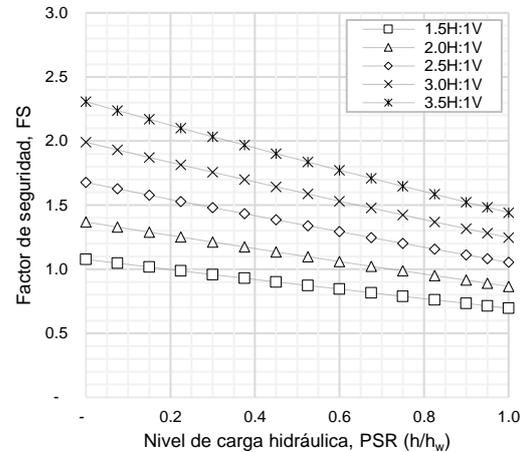


Figura 5.6 Influencia de la carga hidráulica en el valor de FS .

La carga hidráulica también afecta significativamente el FS debido a que genera la reducción de los esfuerzos efectivos y de la resistencia cortante en la interfase. En el caso base, un incremento de 0,1 en h/h_w origina una reducción entre 0,04 y 0,09 en el valor de FS , dependiendo de la inclinación del talud. En taludes extendidos, se verifica que la reducción de FS es más significativa, ello debido a que, siendo h/h_w constante, la fuerza de presión de poros (U_n) será menor a medida que la inclinación del talud se incremente.

5.2.2 Influencia de la resistencia cortante de la interfase

La adhesión aparente (α) y el ángulo de fricción (δ) son los factores principales que contribuyen en la estabilidad física de la cobertura ya que influyen de forma significativa en el incremento de FS , tal como se observa en las Figuras 5.7 y 5.8, respectivamente. En el caso base, el incremento de una unidad en δ y α , puede incrementar entre 0,02 a 0,10 y 0,15 a 0,34 el valor del FS , respectivamente. El incremento del FS es menos significativo en taludes empinados, debido a que el incremento en la inclinación del talud origina la reducción de σ_n y, por consiguiente, también de la resistencia cortante en la interfase.

A partir de estos resultados, se infiere que con una estimación inadecuada de los parámetros de resistencia cortante se podría subestimar o sobrestimar significativamente el valor del factor de seguridad, lo cual daría lugar a un diseño muy conservador sobredimensionado o un diseño inestable subdimensionado, respectivamente. Asimismo, ello resalta la importancia de estimar de forma precisa y confiable los parámetros de resistencia cortante, considerando esfuerzos normales bajos de acuerdo con el nivel de confinamiento esperado y realizando ensayos LSDS de acuerdo con las condiciones específicas de sitio y con los materiales que serán colocados en la construcción.

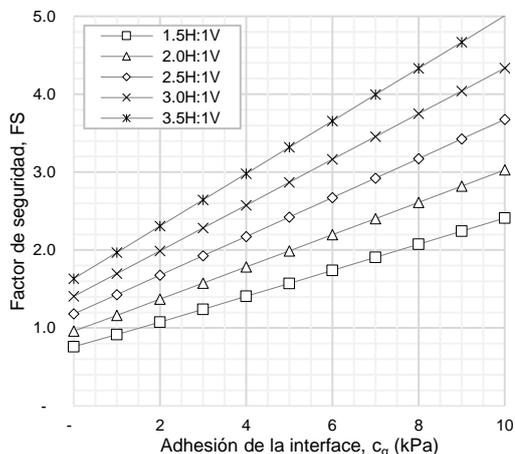


Figura 5.7 Influencia de la adhesión aparente de la interfase en el valor de FS .

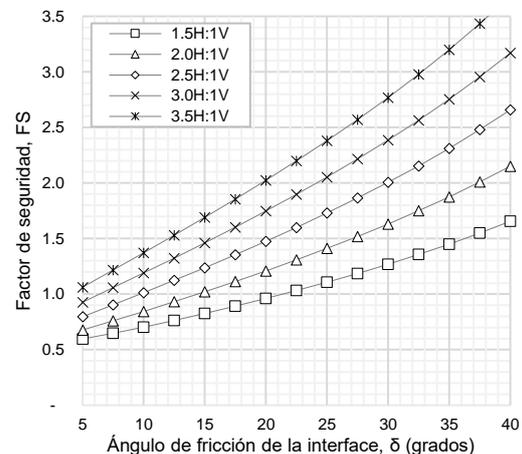


Figura 5.8 Influencia del ángulo de fricción de la interfase en el valor de FS .

5.2.3 Influencia de las propiedades del suelo de la cobertura

La influencia del peso específico (γ_d) y el ángulo de fricción (φ) del suelo de cobertura en el valor del FS se observa en la Figura 5.9 y 5.10, respectivamente. En general, las propiedades del suelo solo influyen en el peso propio de la

cobertura y la resistencia cortante al pie del talud, debido a que el modelo analítico asume que la superficie de falla no atraviesa la cobertura de suelo.

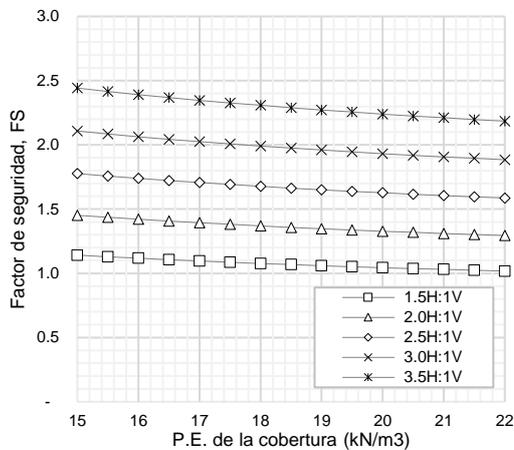


Figura 5.9 Influencia del peso específico del suelo en el valor de FS .

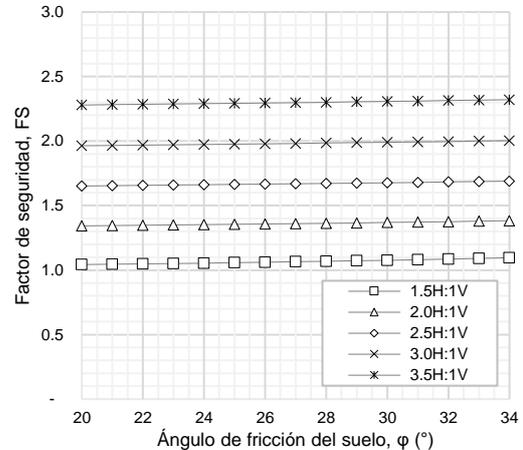


Figura 5.10 Influencia del ángulo de fricción del suelo en el valor de FS .

En el caso base, el incremento de una unidad en γ_d (kN/m^3) origina una reducción de aproximadamente 0,04 en el FS , ello debido a que un mayor peso propio en la cobertura está asociado a un incremento la fuerza de deslizamiento resultante (F). Por otro lado, se verifica que el incremento de ϕ no influye significativamente en el valor del FS , debido a que la longitud de la superficie de falla en el pie del talud es mínima en comparación a longitud total de la cobertura. Por lo tanto, el ángulo de fricción del suelo podría ser estimado a partir de sus características granulométricas y clasificación.

5.2.4 Influencia de las características geométricas de la cobertura

La influencia de las características físicas de la cobertura también ha sido analizada debido a que a menudo puede ser necesario evaluar la reducción de la altura o inclinación del talud cuando se estima que la estabilidad física es desfavorable en las condiciones existentes. Asimismo, si bien es cierto que la estimación del espesor de la cobertura usualmente está definido en base al balance hidráulico o un espesor mínimo que evite la exposición del geosintético a agentes externos, también es necesario evaluar cuál es su influencia en la estabilidad física de la cobertura. A diferencia de los parámetros analizados anteriormente, la influencia de la geometría es variable en diferentes condiciones por lo cual ha sido analizada en conjunto con otros parámetros:

- La inclinación del talud (β) es la variable más importante de las características geométricas de la cobertura. Una mayor inclinación en el talud afecta significativamente la estabilidad física; no obstante, la magnitud de la reducción del FS con respecto al incremento de β es variable en diferentes condiciones, tal como se ha descrito anteriormente cuando se analizó otros parámetros ($k_h, h/h_w, \alpha$ y δ). Dependiendo de cada caso, la reducción del FS con el incremento de β está en el rango de 0,10 a 0,33.
- El incremento del espesor (h_c) está asociado a un incremento del peso propio de la cobertura y, por consiguiente, un incremento de la fuerza de deslizamiento (F). No obstante, también incrementa las fuerzas efectivas normales en las cuñas pasiva (N_p) y activa (N_A) y la resistencia cortante en la superficie de falla. Por ello, dependiendo del equilibrio de fuerzas, el incremento de h_c puede favorecer o no la estabilidad física de la cobertura. Esta variación se distingue principalmente al contrastar el valor del FS obtenido con distintos valores de adhesión aparente (α), tal como se muestra en la Figura 5.11.

Manteniendo constante la longitud de la cobertura (L), cuando $\alpha = 0$, FS se incrementa a medida que h_c es mayor debido a que se presenta un mayor incremento de las fuerzas que estabilizan el sistema, principalmente al pie del talud (N_p), este es conocido como el efecto *buttress* (contrafuerte). Por otro lado, cuando $\alpha > 0$, se añade una fracción de la resistencia cortante (αL) que es independiente del incremento de h_c , mejorando el FS inicial; en este caso la tendencia anterior se revierte ya que el incremento de h_c origina la reducción de FS por el incremento de la fuerza de deslizamiento resultante (F).

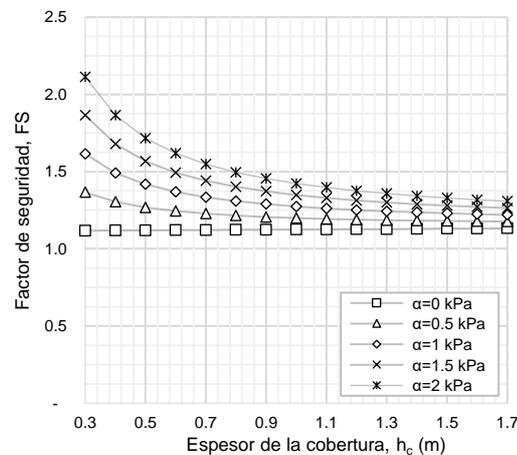


Figura 5.11 Influencia del espesor de la cobertura en FS dependiendo de la adhesión aparente en la interfase.

- El incremento de la altura (H) reduce la influencia de N_p y S_p en la estabilidad física de la cobertura, lo cual da lugar a la reducción del FS . En la Figura 5.12 se observa que a medida que H se incrementa el valor del FS tiende a ser constante; sin embargo, ello está asociado al espesor de la cobertura. En coberturas de altura menor a 15 m, el valor del FS es significativamente mayor para coberturas de alturas mayores a 0,60 m debido al efecto *buttress*.

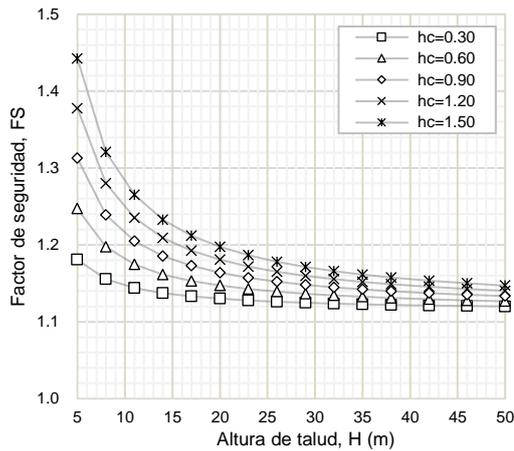


Figura 5.12 Influencia de la altura del talud (H) en FS considerando espesores diferentes (h_c).

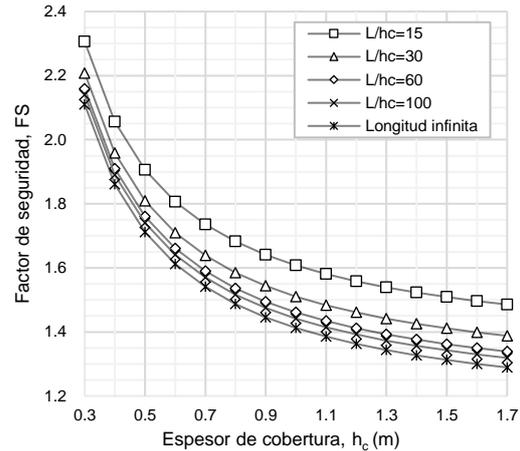


Figura 5.13 Influencia de la relación entre la longitud (L) y espesor de la cobertura (h_c) en FS .

- Thiel (2008) sostiene que el efecto *buttress* es insignificante cuando $L/h_c > 30$, por lo tanto, el análisis de estabilidad puede ser realizado asumiendo un talud infinito. No obstante, esta asunción no es válida. La Figura 5.13 muestra la influencia de L/h_c para el caso base indicado en la Tabla 5.1, donde se verifica que la variación en el FS es mínima cuando $L/h_c > 100$. En general, se observa que considerar un talud infinito podría subestimar el valor del FS hasta en 0,20.

5.2.5 Influencia de la tensión en geosintéticos y las rigideces axiales

La tensión desarrollada en los geosintéticos (por encima de la interfase crítica) es favorable para la estabilidad física del sistema de cobertura al oponerse a las fuerzas de deslizamiento, por lo tanto, una estimación adecuada de la tensión permitiría contar con un diseño más confiable. La tensión en la geomembrana o el GCL usualmente no es estimada ni considerada en el análisis de estabilidad debido a que, en la mayoría de los casos, se asume que la magnitud de la tensión en estos geosintéticos es mínima y es menor a su tensión última. No obstante, esta suposición debe ser verificada. Por otro lado, la tensión desarrollada en

geomallas sí requiere una evaluación precisa dado que su función es el reforzamiento de la cobertura, más aún si estas son construidas en taludes muy empinados y de gran altura o condiciones de servicio severas.

La influencia de la tensión en el geosintético en la estabilidad física, en términos del FS , y las variables que determinan su magnitud (K_C y K_T) han sido analizadas en diferentes escenarios. La interpretación de los resultados del análisis paramétrico de estas variables se detalla a continuación:

5.2.5.1 Influencia de la tensión en el geosintético

El incremento de la tensión en la geomalla incrementa significativamente el valor de FS , tal como se observa en la Figura 5.14, en la cual el incremento de FS incluso es exponencial en taludes de menor altura. No obstante, no es necesario que el factor de seguridad sea muy alto ya que el diseño de coberturas tradicionalmente se realiza en base a un FS mínimo aceptable. Por tal motivo, la evaluación del reforzamiento suele realizarse estimando el valor mínimo de T_{gs} necesario para garantizar un FS aceptable. En base a este criterio, la Figura 5.15 muestra el valor de T_{gs} necesario para alcanzar un FS igual a 1,5 (en condición estática), en escenarios con alturas e inclinaciones de talud diferentes.

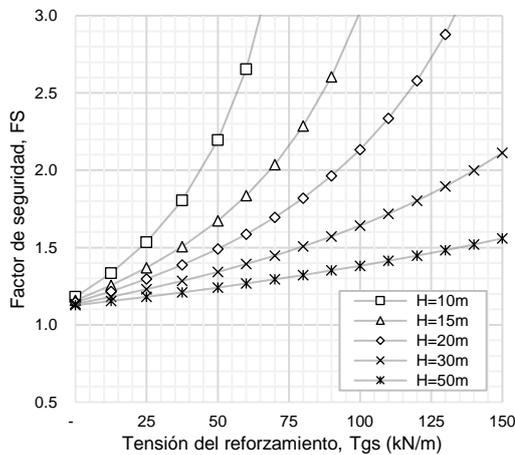


Figura 5.14 Influencia de la tensión de reforzamiento en FS , considerando taludes con alturas diferentes.

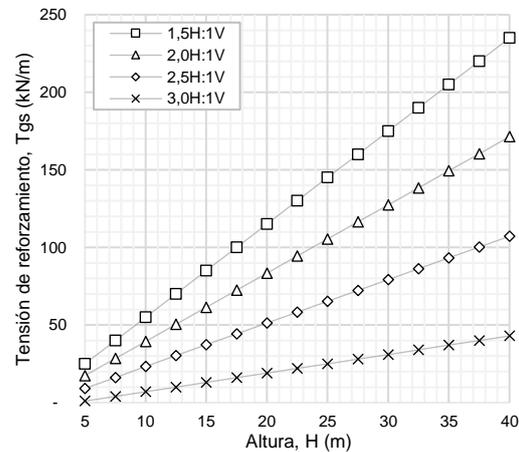


Figura 5.15 Tensión de reforzamiento necesaria para un $FS=1.5$ en alturas e inclinaciones de talud diferentes.

Se observa que el valor de T_{gs} obtenido para un talud de 1,5H:1V es entre 6 a 10 veces la tensión necesaria para un talud de 3,0H:1V, dependiendo de su altura (H). En el caso más desfavorable, el valor de T_{gs} obtenido incluso es mayor a 200 kN/m. Asimismo, a partir de los resultados anteriores, se infiere que el

reforzamiento es más efectivo en coberturas sobre taludes de gran altura cuando la pendiente es baja y sobre taludes empinados cuando la altura es menor.

5.2.5.2 Influencia de las rigideces axiales en compresión y tensión

La estimación del valor de T_{gs} mínimo para alcanzar un FS aceptable no es suficiente en la evaluación del reforzamiento, también es necesario evaluar si esta tensión realmente se genera en la geomalla debido a que este material tiene un comportamiento pasivo. De acuerdo con el modelo analítico aplicado, la tensión generada está en función de la rigidez axial a la compresión del suelo (K_C) y la rigidez axial a la tensión del geosintético (K_T), tal como se ha descrito en la Sección 3.4. Las Figuras 5.16 y 5.17 muestran la influencia de ambos parámetros en el factor de seguridad.

En el primer caso, la Figura 5.16 muestra la influencia en FS del uso de geomallas de diferente rigidez, desde aquellas que son relativamente flexibles y tienen una resistencia baja ($K_T=150$ kN/m) hasta aquellas que son rígidas y tienen una resistencia muy alta ($K_T=2000$ kN/m). La tendencia obtenida verifica que el incremento de FS está asociado al incremento de la rigidez a la tensión en el geosintético. No obstante, dicho incremento es menos significativo en taludes de gran altura, donde la fuerza de deslizamiento resultante (F) es mayor y se requiere una tensión de reforzamiento alta. Por ejemplo, el incremento obtenido en el valor de FS es apenas 0,04 para un talud de 40 m de altura, incluso considerando una geomalla de alta resistencia.

Por otro lado, el valor de K_C tiene un efecto contrario a K_T , tal como se observa en la Figura 5.17, ello se debe a que el modelo asume que la deformación axial en el suelo y el geosintético es igual por tener un comportamiento en conjunto; por lo tanto, a medida que el suelo es más rígido, la columna actúa predominantemente en compresión, la deformación axial en la geomalla disminuye y, en consecuencia, también la tensión de reforzamiento y el valor de FS .

El caso más desfavorable es con un suelo incompresible, donde la tensión de reforzamiento generada es nula al no producirse deformación axial. En cambio, cuando K_C es mínimo (p. ej., 100 kN/m), las cargas axiales son transferidas principalmente al geosintético, por lo cual el valor de T_{gs} se incrementa favoreciendo la estabilidad del sistema.

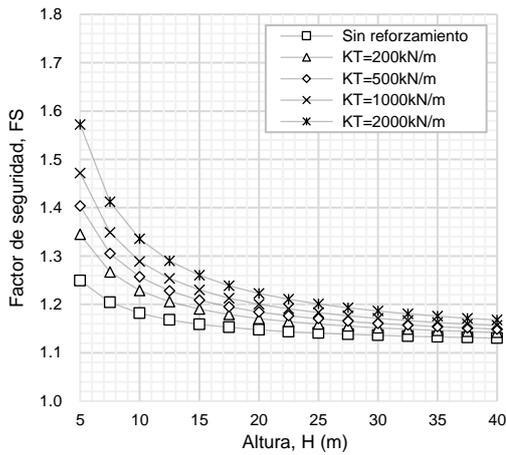


Figura 5.16 Influencia de la tensión de reforzamiento en FS considerando diferentes alturas de talud.

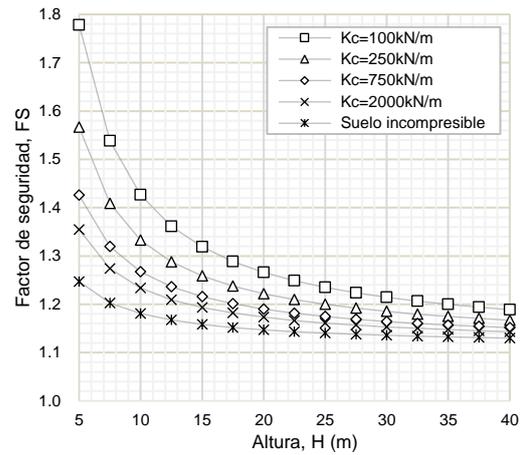


Figura 5.17 Tensión de reforzamiento necesaria para un $FS = 1.5$ considerando diferentes alturas de talud.

La relación entre las rigideces en compresión y tensión en la columna es determinante en la distribución de cargas axiales. La columna podría actuar predominantemente en tensión si la relación K_C/K_T es muy baja o predominantemente en compresión si la relación K_C/K_T es muy alta.

La Figura 5.18 muestra la influencia de K_C/K_T en FS , donde se verifica que el incremento en FS comienza a ser significativo cuando $K_C/K_T < 1,0$. Asimismo, se verifica que la relación entre K_C y K_T no solo influye en la magnitud de las cargas axiales sino también en la longitud de las zonas que se encuentran en compresión o tensión a lo largo de la cobertura, tal como se observa en la Figura 5.19 donde se verifica que menos del 50 % de la cobertura se encuentra en tensión cuando $K_C/K_T > 1,0$.

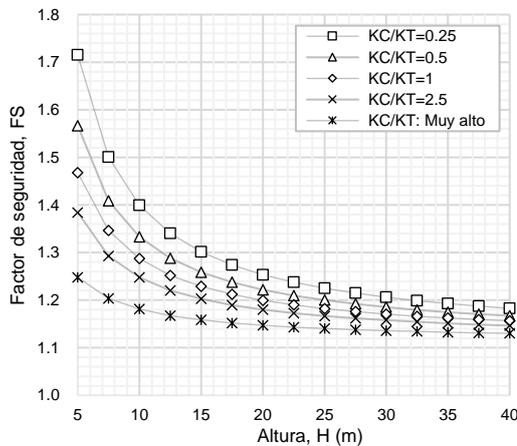


Figura 5.18 Influencia de la relación K_C/K_T en el FS considerando alturas de talud diferentes.

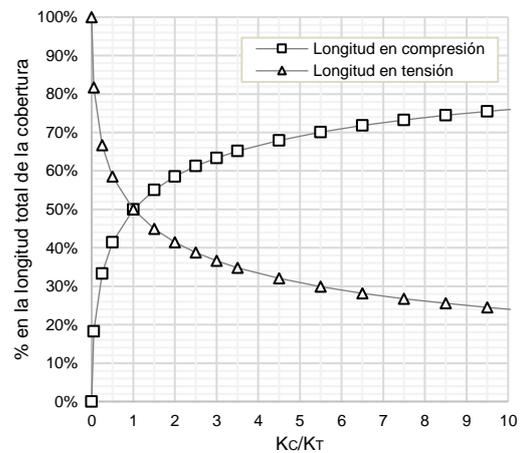


Figura 5.19 Influencia de la relación K_C/K_T en las longitudes en tensión y compresión.

Un reforzamiento efectivo resulta cuando la tensión desarrollada en el geosintético es significativa, lo cual ocurre cuando K_C/K_T tiene valores muy bajos. No obstante, si la geomalla concentra gran parte de la carga axial en la columna, podría desarrollar tensiones y deformaciones muy altas hasta alcanzar un estado de fluencia o rotura afectando seriamente la estabilidad física de la cobertura. Por tal motivo, la influencia de K_C/K_T en el desarrollo de la tensión también debe ser analizada de tal forma que se contraste la tensión de trabajo (T_{gs}) y la tensión última (T_u) en la geomalla. Este análisis se ha realizado considerando dos geomallas con tensiones últimas entre 25 y 125 kN/m, a un 5 y 10 % de deformación axial que es usual en geomallas de PVA y poliéster, respectivamente, ambas comúnmente en el diseño con geosintéticos.

Las Figuras 5.20 y 5.21 comparan la tensión obtenida en estas geomallas luego de haber evaluado diferentes valores de K_C y K_T , considerando un talud de 2,5H:1V y condiciones de servicio severas ($PSR=0,5$ y $k_h=0,1$).

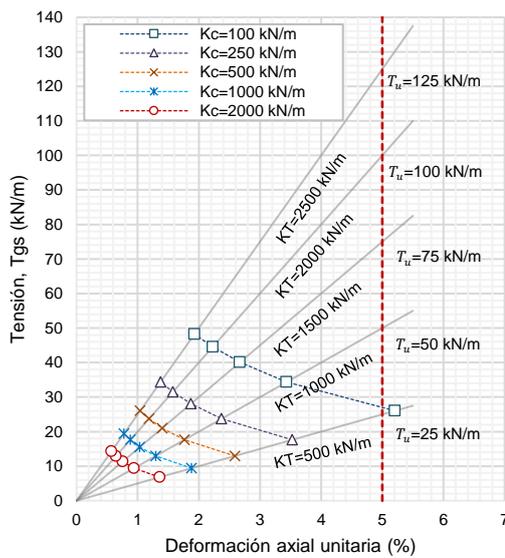


Figura 5.20 Comparación entre la tensión de trabajo y la tensión última al 5 % de deformación.

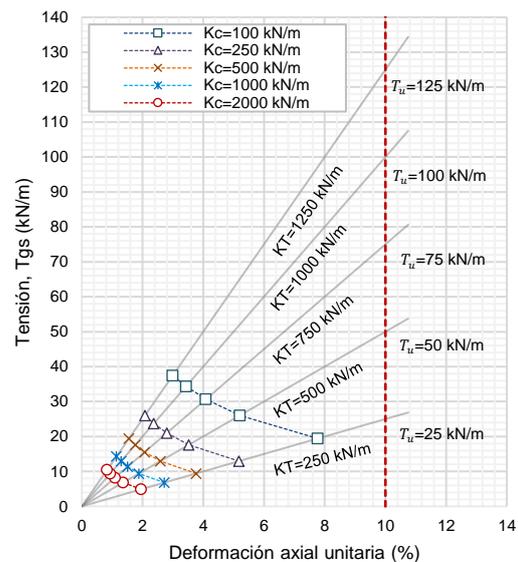


Figura 5.21 Comparación entre la tensión de trabajo y la tensión última al 10 % de deformación.

En la Figura 5.21, se observa que la relación T_{gs}/T_u obtenida se encuentra en el rango de 8 a 73 %, aproximadamente, aún sin alcanzar un estado de fluencia, mientras en la Figura 5.20 este rango se encuentra entre 11 y 104 %, en este último caso el material sí alcanza el estado de fluencia lo cual significa la posible ruptura de la geomalla y consecuente falla en la cobertura. Estos resultados verifican que la influencia de K_C y K_T en la estabilidad física no solo debe ser

analizada a través del *FS* definido en el modelo, sino también analizando la tensión desarrollada en la geomalla lo cual debe ser considerado en el diseño.

5.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA DETERMINÍSTICO

La estabilidad física de los sistemas de cobertura con geosintéticos considerados en el presente estudio ha sido analizada en múltiples escenarios inicialmente bajo un enfoque determinístico, dicho análisis fue realizado con el método analítico propuesto por Koshand *et al.* (2018) descrito en la Sección 5.1.1.

El análisis se ha realizado en cada una de las interfases de los sistemas de cobertura considerando diferentes condiciones de servicio, alturas, inclinaciones de talud y tipos de reforzamiento. La Figura 5.20 resume todos los escenarios que fueron planteados para los análisis de estabilidad. El propósito de haber considerado la mayor cantidad de escenarios posibles es identificar condiciones de estabilidad para cada sistema de cobertura, es decir, donde se cumplen los factores de seguridad mínimos en las condiciones de servicio analizadas.

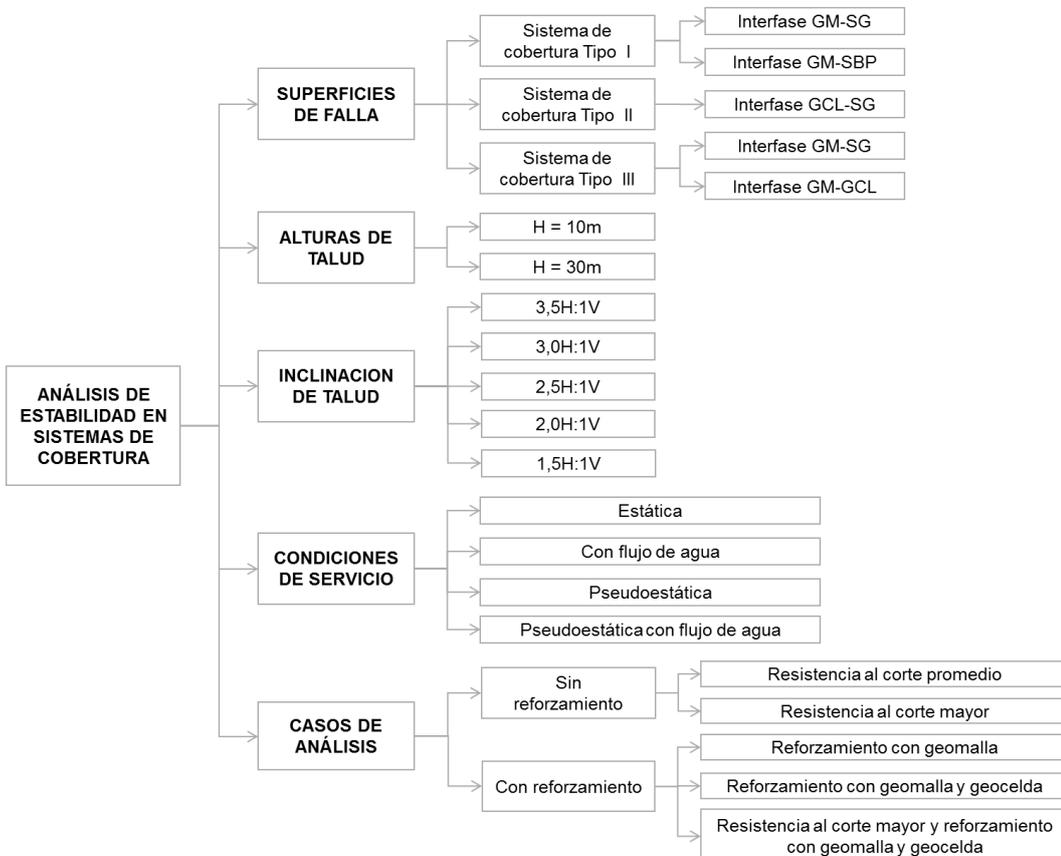


Figura 5.22 Escenarios considerados en el análisis de estabilidad de los sistemas de cobertura.

5.3.1 Superficies de falla de análisis

El análisis de estabilidad usualmente se realiza asumiendo que la interfase más débil es la interfase donde se produce la falla del sistema de cobertura, ya sea por encima o debajo de la capa de revestimiento. Asimismo, algunos análisis suelen considerar solo la interfase entre la capa de suelo y el geosintético de revestimiento (GM ó GCL) considerando que éste último se encuentra anclado en la cresta del talud por lo cual la falla de la cobertura por debajo del revestimiento es menos probable.

En el presente estudio la estabilidad de cada sistema de cobertura ha sido analizada no solo en la interfase más débil o por encima del revestimiento sino en todas las interfaces identificadas en cada caso. La necesidad de analizar todas las interfaces se justifica por las siguientes razones:

- No es posible generalizar cuál es la interfase más débil en los sistemas de cobertura analizados, debido a que la resistencia cortante depende de distintos factores como los componentes de la interfase, el nivel de confinamiento, la condición asumida (pico o residual), entre otros aspectos; tal como se ha verificado en la Sección 4.3. Es decir, la ubicación de la interfase más débil será variable en diferentes condiciones durante la vida útil de la cobertura.
- La influencia del flujo de agua en la estabilidad física no es igual por encima o debajo de la capa de revestimiento, debido a que los esfuerzos efectivos son diferentes en ambos casos, tal como se ha descrito en la Sección 3.2. Por tal motivo, a pesar de que la interfase más débil pueda encontrarse por debajo del revestimiento, la falla de la cobertura podría producirse por encima contradiciendo el criterio de la interfase crítica.
- El anclaje del geosintético no necesariamente garantiza que la falla no se produzca por debajo del revestimiento. El anclaje usualmente consiste en un bloque de concreto colocado en una zanja que se encuentra a lo largo de la cresta del talud, no obstante, en algunas coberturas el anclaje también se realiza con zanjas rellenas con material compactado (p. ej., Foye, 2011) o soldando la geomembrana sobre cintas de polietileno (*polylock*). En estos dos últimos casos, a largo plazo, el deterioro de la soldadura o la incorporación de

cargas no previstas en el diseño podría originar la falla de la cobertura por debajo del geosintético si es la interfase más débil.

- La superficie de falla también podría situarse por debajo del revestimiento cuando se produce la rotura del geosintético. Ello podría ocurrir cuando el geosintético se encuentra sometido a cargas de tensión debido a la dilatación del material o la distribución de esfuerzos en ambas caras; el efecto *creep* a largo plazo que da lugar a la degradación de sus propiedades mecánicas e incrementa su elongación; la acción de esfuerzos de tensofisuración en el anclaje que originan fisuras progresivas a lo largo de la lámina, entre otros aspectos.

En el caso de los sistemas de cobertura tipos II y III, el análisis no ha considerado la interfase entre el geosintético y la subrasante debido a que la resistencia cortante en esta interfase dependerá del tipo de material contenido (relave, material lixiviado o desmonte) lo cual será específico para cada caso de estudio.

5.3.2 Inclinaciones y alturas de talud

El análisis de estabilidad ha sido realizado considerando diferentes inclinaciones de talud, desde taludes extendidos (3,5H:1V) hasta taludes empinados (1,5H:1V), los cuales son comunes en la superficie de cierre de componentes mineros. El propósito ha sido contrastar la estabilidad física de cada sistema de cobertura en estos taludes y así identificar desde qué inclinación de talud es necesario cada tipo de reforzamiento. Por otro lado, dicho análisis ha sido realizado considerando taludes de 10 m (común en *lifts* de pilas de lixiviación) y 30 m de altura (altura máxima en bancos de depósitos de desmonte). Se ha considerado alturas de 10 m debido a la influencia del efecto *buttress* al pie del talud y alturas de 30 m debido a que la efectividad del reforzamiento se reduce a medida que la altura del talud se incrementa, tal como se ha verificado en el análisis paramétrico realizado como parte de esta investigación.

5.3.3 Condiciones de servicio y factores de seguridad mínimos

El análisis de estabilidad se ha realizado considerando las siguientes condiciones de servicio: estática, con flujo de agua, pseudoestática y pseudoestática con flujo de agua. La condición estática es la condición más probable durante la vida útil de la cobertura, donde el deslizamiento es generado principalmente por su peso

propio. Las condiciones de servicio con flujo de agua o carga sísmica tienen una duración y probabilidad de ocurrencia menor, no obstante, su influencia en la estabilidad de la cobertura es significativa, tal como se ha descrito en las Secciones 3.3 y 3.4, respectivamente. En estas condiciones se ha considerado un rango entre 0,0 a 0,3 para el coeficiente sísmico (k_h) y un rango entre 0,0 a 1,0 para relación entre la carga hidráulica y el espesor de la cobertura (PSR).

La condición más conservadora es la condición pseudoestática con flujo de agua, si bien es cierto que se trata de un caso muy crítico, es importante conocer cómo la estabilidad de la cobertura es afectada en este escenario. Asimismo, si bien es cierto que en esta condición existen múltiples escenarios posibles, en el análisis solo se ha considerado un k_h igual a 0,10 y un PSR igual a 0,50, asumiendo que solo el espesor de la capa de drenaje se encuentra completamente saturada.

Los factores de seguridad obtenidos en el análisis han sido contrastados con los factores de seguridad aceptables mínimos (FS_{min}) que se presentan en la Tabla 5.2. Estos factores de seguridad fueron adoptados por Datta (2009) para la evaluación de coberturas en depósitos de residuos peligrosos y son los únicos que se presentan en la literatura existente en función a las condiciones de servicio.

Tabla 5.2 Condiciones de servicio, rango de análisis y valores de FS aceptables mínimos.

Condición de servicio	Abreviatura	Rango de análisis	FS_{min}
Estática (a largo plazo)	E	-	1,5
Con flujo de agua, durante una precipitación (duración corta)	F	$h_w/h = 0,0$ a 1,0	1,3
Pseudoestática, durante un sismo (duración muy corta)	PS	$k_h = 0,0$ a 0,3	1,1
Pseudoestática y con flujo de agua (evento crítico, probabilidad de ocurrencia mínima)	PS+F	$h_w/h = 0,5$ y $k_h = 0,1$	1,0

Fuente: Adaptado de Datta, 2009.

5.3.4 Casos de análisis

5.3.4.1 Análisis de cobertura sin reforzamiento

El análisis de estabilidad en coberturas sin reforzamiento se realizó considerando los parámetros de resistencia cortante promedio y la resistencia cortante mayor que se obtuvieron para cada tipo de interfase en los ensayos LSDS. Este último caso se consideró porque es el más favorable para la estabilidad física de la cobertura. En ambos casos, se consideraron los parámetros de resistencia

cortante en condición residual, debido a que las coberturas de cierre serán estructuras permanentes y existen diversos mecanismos a corto y largo plazo que pueden movilizar los esfuerzos de corte residual en la interfase durante la vida útil de la cobertura, tal como se ha descrito en la Sección 3.5. Los parámetros empleados en los análisis se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Resumen de parámetros de resistencia cortante residual empleados en el análisis de estabilidad de sistemas de cobertura.

Interfase	Resistencia cortante residual promedio		Resistencia cortante residual límite superior	
	α (kPa)	δ (°)	α (kPa)	δ (°)
GM-SG	1,2	18,4	2,0	25,5
GM-SBP	1,9	19,3	-	33,8
GCL-SG	9,7	30,9	10,5	36,5
GM-GCL	2,9	13,4	(*)	(*)

(*) Solo se realizó un ensayo en la interfase GM-GCL.

En el caso de la interfase GM-GCL se ha considerado solo los parámetros del ensayo con el lado del geotextil no tejido (NW), debido a que con el lado tejido (W) la resistencia cortante en la interfase es mínima y no es recomendable dicha configuración ya que produciría cargas en tensión permanentes en el GCL.

5.3.4.2 Análisis de cobertura con reforzamiento

El reforzamiento de los sistemas de cobertura también ha sido evaluado a fin de identificar en qué condiciones es necesaria su aplicación, debido a que el FS a menudo resulta menor a $FS_{mín}$ a medida que la altura e inclinación del talud se incrementa y las condiciones de servicio son más severas, por lo cual no solo basta con la resistencia cortante en la interfase. En tal sentido, se ha considerado tres casos de análisis. El primer caso consiste en la aplicación de geomallas, donde la cobertura tiene un comportamiento tanto en tensión como en compresión. El segundo caso consiste en añadir geoceldas a la geomalla, de tal forma que el comportamiento axial de la cobertura sea predominantemente en tensión y, por último, el tercer caso consiste en adicionalmente considerar la mayor resistencia cortante en las interfases de análisis. Los parámetros empleados en cada caso se presentan en la Tabla 5.4.

La rigidez a la tensión (K_T) considerada en el análisis para coberturas sobre taludes de 10 y 30 m de altura fue 1500 y 3000 kN/m, respectivamente. Estos parámetros se definieron considerando el uso de geomallas con una tensión última de 75 y 150 kN/m, al 5 % de deformación axial, lo cual suele ser típico en

geomallas de PVA. Asimismo, teniendo en cuenta que la efectividad del reforzamiento (medida en función del incremento del factor de seguridad) es menor a medida que la altura del talud se incrementa, la mayor rigidez a la tensión (3000 kN/m) se consideró en el talud de 30 m de altura a fin de contar con una mayor tensión de reforzamiento que favorezca la estabilidad de la cobertura.

Tabla 5.4 Resumen de parámetros de rigidez axial empleados en la evaluación del reforzamiento.

Caso de análisis	Rigidez a la tensión, K_T (kN/m)		Rigidez a la compresión, K_C (kN/m)
	$H = 10m$	$H = 30m$	
Reforzamiento con geomalla	1500	3000	969
Reforzamiento con geomalla y geocelda			
Resistencia cortante mayor y reforzamiento con geomallas y geocelda	1500	3000	0,1 (K_T)

La justificación de considerar geomallas de PVA se basa en que este material presenta una mayor rigidez a la tensión en comparación a geomallas de poliéster, cuya tensión última suele producirse al 10 % de deformación axial. No se ha considerado el uso de geomallas de polipropileno, ya que si bien es cierto que son mucho más rígidas (la tensión última suele producirse al 2 % de deformación axial), también suelen ser menos trabajables lo cual dificulta su instalación.

La rigidez a la compresión del suelo (K_C) considerada en el análisis fue diferente en función al tipo de reforzamiento. En el reforzamiento con geomallas, K_C se estimó en base a las propiedades definidas por Villard *et al.* (1999) para coberturas de suelo granular. Villard *et al.* (1999) realizaron ensayos de campo y un proceso de calibración con métodos numéricos (*back analysis*) con lo cual estimaron un módulo de elasticidad (E) igual a 1200 kPa aproximadamente y un coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,30 para la cobertura de suelo. De acuerdo con ello, considerando un espesor de 0,60 m, el valor de K_C resulta igual a 969 kN/m.

En el reforzamiento con geomallas y geoceldas, la rigidez a la compresión del suelo suele ser mínima ya que el suelo se encuentra confinado dentro de la geocelda y el peso propio de la cobertura es transferido hacia la geomalla. No obstante, no toda la cobertura se encuentra en tensión debido a que aún se produce el efecto *buttress* al pie del talud. Asimismo, no sería un criterio correcto obviar la rigidez a la compresión en el análisis, ya que la tensión de reforzamiento podría ser sobreestimada. En base a ello, en el análisis se ha considerado un valor de K_C/K_T igual a 0,10 con el propósito de que la tensión en la cobertura tenga lugar en al menos un 75 % de su longitud total, tal como se muestra en la Figura 5.17.

Ello constituye un criterio relativamente conservador debido a que el valor de K_C en realidad podría ser menor lo cual favorecería el incremento de la tensión de reforzamiento y, por consiguiente, también incrementaría el factor de seguridad.

5.3.5 Presentación y discusión de resultados

Los factores de seguridad obtenidos se han graficado en curvas de tendencia donde se contrasta su variación con respecto a parámetros como la altura del talud (H) el coeficiente sísmico (k_h) y la carga hidráulica (PSR) que son los parámetros de mayor influencia en la estabilidad física de la cobertura. Los FS mínimos que se indicaron en la Tabla 5.2 también se muestran en cada gráfico de acuerdo a la condición de servicio analizada.

Los gráficos obtenidos del análisis de cada sistema de cobertura para taludes de 10 y 30 m de altura se presentan en los Anexos 1.1 y 1.2, respectivamente, los cuales se han agrupado en función al tipo de interfase y los casos de análisis que se indicaron en la Sección 5.3.4. Con el propósito de facilitar el análisis e interpretación de estos resultados, se han definido diferentes condiciones con rangos específicos de valores de H , k_h y PSR , en donde se cumplen los FS mínimos para cada condición de servicio analizada, los cuales se presentan en la Tabla 5.5. Cada condición ha sido identificada con un color específico a fin de poder evaluar fácilmente los resultados de los análisis de estabilidad.

En base a los criterios de evaluación que se definieron, en la Tabla 5.6 se presentan los resultados de los análisis de estabilidad en condición estática para los tres sistemas de cobertura analizados. De igual forma, en la Tabla 5.7 se presenta los resultados para condiciones pseudoestática (PS), con filtración (F) y pseudoestática con filtración (PS+F).

Tabla 5.5 Rangos de altura, coeficiente sísmico y carga hidráulica donde se cumplen los FS mínimos para cada condición de servicio.

Condición de servicio	Color	Condiciones donde se cumple el FS mínimo
Condición estática	Dark Blue	Altura máxima entre 30 y 40 m
	Blue	Altura máxima entre 20 y 30 m
	Light Blue	Altura máxima entre 10 y 20 m
	Light Green	Altura máxima entre 5 y 10 m
	White	No se cumple el FS mínimo
Condición con filtración (F)	Dark Blue	PSR máximo entre 0,75 y 1,0
	Blue	PSR máximo entre 0,50 y 0,75
	Light Blue	PSR máximo entre 0,25 y 0,50
	Light Green	PSR máximo entre 0,0 y 0,25
	White	No se cumple el FS mínimo
Condición con sismo (PS)	Dark Blue	k_h máximo mayor a 0,15
	Blue	k_h máximo entre 0,10 y 0,15
	Light Blue	k_h máximo entre 0,05 y 0,10
	Light Green	k_h máximo entre 0 y 0,05
	White	No se cumple el FS mínimo
Condición con sismo y filtración (PSR=0,5)	Dark Blue	k_h máximo mayor a 0,15
	Blue	k_h máximo entre 0,10 y 0,15
	Light Blue	k_h máximo entre 0,05 y 0,10
	Light Green	k_h máximo entre 0 y 0,05
	White	No se cumple el FS mínimo

Tabla 5.6 Resumen de resultados de los análisis de estabilidad en condición estática.

Interfase crítica	Caso	Inclinación de talud				
		1,5H:1V	2,0H:1V	2,5H:1V	3,0H:1V	3,5H:1V
GM-SG Sistema de cobertura: tipo I y tipo III	Resistencia cortante promedio					
	Resistencia cortante mayor			Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomallas (*)			Light Green	Light Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	Light Green	Light Green	Light Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Resistencia cortante mayor y reforzamiento con G+G	Light Green	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
GM-SBP Sistema de cobertura: tipo I	Resistencia cortante promedio					
	Resistencia cortante mayor				Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomallas (*)			Light Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	Light Green	Light Green	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Resistencia cortante mayor y reforzamiento con G+G	Light Green	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
GCL-SG Sistema de cobertura: tipo II	Resistencia cortante promedio	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Resistencia cortante mayor	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomallas (*)	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Resistencia cortante mayor y reforzamiento con G+G	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue
GM-GCL Sistema de cobertura: tipo III	Resistencia cortante promedio				Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomallas (*)			Light Blue	Dark Blue	Dark Blue
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	Light Green	Light Green	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue

(*) Considerando la resistencia cortante promedio en la interfase crítica.

Tabla 5.7 Resumen de resultados de los análisis de estabilidad en condiciones pseudoestática, con filtración y pseudoestática con filtración.

Interfase crítica	Caso	Condición de análisis	H=10m					H=30m						
			1,5H:1V	2,0H:1V	2,5H:1V	3,0H:1V	3,5H:1V	1,5H:1V	2,0H:1V	2,5H:1V	3,0H:1V	3,5H:1V		
GM-SG Sistema de cobertura: tipo I y tipo III	Resistencia cortante promedio	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Resistencia cortante mayor	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomallas (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
Resistencia cortante mayor y reforzamiento con G+G	PS													
	F													
	PS+F (**)													
GM-SBP Sistema de cobertura: tipo I	Resistencia cortante promedio	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Resistencia cortante mayor	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomallas (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
Resistencia cortante mayor y reforzamiento con G+G	PS													
	F													
	PS+F (**)													
GCL-SG Sistema de cobertura: tipo II	Resistencia cortante promedio	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Resistencia cortante mayor	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomallas (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (G+G) (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
Resistencia cortante mayor y reforzamiento con G+G	PS													
	F													
	PS+F (**)													
GM-GCL Sistema de cobertura: tipo III	Resistencia cortante promedio	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomallas (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												
	Reforzamiento con geomalla y geocelda (*)	PS												
		F												
		PS+F (**)												

(*) Considerando la resistencia cortante promedio en la interfase crítica.

(**) Considerando un PSR igual a 0,5.

5.3.5.1 Sistema de cobertura Tipo I (con GM)

En coberturas con geomembrana, se tienen las interfases GM-SG y GM-SBP. En los resultados que se presentan en la Tabla 5.6 se observa que los análisis con la interfase GM-SG presentan menores factores de seguridad que la interfase GM-SBP para una misma condición de servicio. En este último caso, los FS obtenidos son relativamente mayores, principalmente al analizar la cobertura en condición de servicio con filtración donde la influencia del PSR no es significativa incluso considerando una saturación completa en la cobertura ($PSR=1,0$), debido a que debajo de la geomembrana los esfuerzos efectivos son iguales a los esfuerzos totales, en este escenario solamente se tiene una reducción de hasta 0,1 del valor de FS obtenido en condición estática ($PSR=0$).

Si el diseño se desarrolla considerando que la interfase GM-SG representa la superficie de deslizamiento más crítica, en taludes de 3,5H:1V se cumplen los FS requeridos con la resistencia cortante promedio de la interfase, en condición estática, incluso con alturas de hasta 40 m. No obstante, en condiciones con sismo y filtración los FS requeridos se cumplen solo si $PSR < 0,5$ y $k_h < 0,15$, respectivamente, ya sea en alturas de 10 o 30 m. En taludes más inclinados, los FS son menores a 1,5 en condición estática, mientras que en condiciones con sismo y filtración, se cumplen los FS mínimos si $k_h < 0,10$ y $PSR < 0,25$, respectivamente.

Como era de esperar, las condiciones de estabilidad mejoran significativamente al considerar el límite superior de la resistencia cortante de la interfase. En condición estática, se han obtenido FS mayores a 1,5 a partir de taludes con inclinación menor a 2,5H:1V y mayores a 1,4 en taludes de 2,0H:1V, incluso en alturas mayores a 40 m. Asimismo, en condición con sismo y filtración, se cumplen los FS mínimos en condiciones severas si $k_h < 0,15$ y $PSR < 0,75$, respectivamente. Por otro lado, considerando la condición más crítica de sismo con filtración, si $PSR=0,5$ se estima que la cobertura sería estable cuando $k_h < 0,15$.

La aplicación de geomallas mejora ligeramente la estabilidad en coberturas con interfases de resistencia cortante promedio. En condición estática, para taludes de 3,5H:1V, 2,5H:1V y 2,0H:1V se cumplen los FS mínimos en alturas de hasta 40, 20 y 10 m, respectivamente. En condición con sismo y filtración, las condiciones de estabilidad identificadas son diferentes en alturas de 10 y 30 m. En el primer

caso, el reforzamiento con geomallas permitiría que se cumplan los FS mínimos en condiciones de servicio severas ($k_h > 0,15$ o $PSR < 0,75$) y moderadas ($k_h < 0,15$ o $PSR < 0,50$), para taludes con inclinaciones de 3,5H:1V y 3,0H:1V, respectivamente. En cambio, en alturas de 30 m, los FS mínimos se cumplen para condiciones de servicio menos severas ($k_h < 0,15$ o $PSR < 0,75$) y relativamente leves ($k_h < 0,10$ o $PSR < 0,25$), para taludes con inclinaciones de 3,5H:1V y 3,0H:1V, respectivamente. Por otro lado, en la condición de servicio más crítica de sismo y filtración, si $PSR = 0,5$ se estima que la cobertura sería estable cuando $k_h < 0,10$ en taludes de 3,0H:1V y 30 m de altura y cuando $k_h < 0,15$ en taludes de 3,5H:1V y 10 m de altura.

En los resultados obtenidos se observa que la incorporación de geomallas no es suficiente para garantizar la estabilidad de la cobertura en taludes mayores a 2,5H:1V. Por lo tanto, es necesaria la incorporación de geoceldas para contar con un comportamiento predominantemente en tensión e incrementar el FS . Al considerar este reforzamiento en taludes de 10 m, se cumplen los FS mínimos en condiciones de servicio severas ($k_h > 0,15$ o $PSR < 0,75$) para taludes de 3,0H:1V y condiciones moderadas ($k_h < 0,15$ o $PSR < 0,50$) para taludes de 2,5H:1V. No obstante, no hay una variación significativa en los resultados en taludes de 30 m a pesar de haberse considerado una mayor resistencia a la tensión en el reforzamiento. En ambas alturas evaluadas, la estabilidad podría ser más favorable si se considera un reforzamiento de mayor resistencia.

Un diseño adecuado sería aquel donde la resistencia cortante en la interfase es adecuada y adicionalmente se emplean geomallas y geoceldas, bajo estas consideraciones la cobertura podría ser construida en taludes de 10 m de altura incluso con inclinaciones de hasta 1,5H:1V, y en taludes de 30 m en inclinaciones menores a 2,0H:1V. En inclinaciones mayores también es aplicable este tipo de reforzamiento, no obstante, es necesario evaluar geomallas de mayor resistencia a fin de incrementar la tensión de reforzamiento y, por consiguiente, también FS .

5.3.5.2 Sistema de cobertura Tipo II (con GCL)

En coberturas con GCL sin reforzamiento todos los escenarios evaluados cumplen con los FS mínimos aceptables, incluso en taludes muy empinados (1,5H:1V) y condiciones de servicio severas ($PSR > 0,5$ y $k_h > 0,15$). Por lo tanto, de acuerdo con estos resultados, para que la cobertura sea estable bastaría con la resistencia

cortante de la interfase GCL-SG. No obstante, ello es válido solo bajo la asunción de que el mecanismo de falla es en bloque y tiene lugar a lo largo de la interfase crítica (ver Sección 5.1.1).

La observación anterior resulta válida principalmente para coberturas sobre taludes cuya inclinación es menor a 2,0H:1V, debido a que la resistencia cortante de la capa de suelo ($\varphi \cong 30^\circ$) aún permite que se mantenga estable luego de ser colocada y, a largo plazo, será mayor por el crecimiento de raíces manteniendo así su estructura en bloque.

Por otro lado, en taludes cuya inclinación es mayor a 2,0H:1V, no necesariamente se garantiza que el mecanismo de falla sea en bloque tal como se asume en el análisis de estabilidad. La superficie de falla también puede situarse a lo largo de la capa de drenaje donde la resistencia cortante del suelo será menor que el de la interfase, más aun teniendo en cuenta que la cohesión interna del suelo es baja o nula antes de que se produzca el crecimiento de las raíces.

Por lo tanto, en coberturas con GCL sobre taludes empinados es necesario evaluar la aplicación de geomallas y geoceldas, inclusive por temas constructivos ya que este tipo de reforzamiento facilitaría la colocación del material y se tendrían menos riesgos de seguridad.

5.3.5.3 Sistema de cobertura Tipo III (con GM y GCL)

En el sistema de cobertura Tipo III el deslizamiento puede producirse por encima o debajo de la geomembrana, a través de las interfases GM-SG o GM-GCL, respectivamente. El escenario más probable es que la superficie crítica sea la interfase GM-SG, en tal caso, las condiciones de estabilidad para esta cobertura son las mismas que se detallaron en la Sección 5.3.5.1. En cambio, si la superficie crítica es la interfase GM-GCL, estas condiciones son muy similares a las obtenidas en interfases GM-SBP, las cuales serán detalladas en la presente sección.

En fallas a lo largo de interfases GM-GCL, la influencia del PSR no es significativa en una condición de servicio con filtración al encontrarse por debajo de la geomembrana. En el escenario más desfavorable (PSR=1,0), el valor de FS obtenido en esta condición solo es menor hasta en 0,1 al valor obtenido en condición estática. Por lo tanto, en esta interfase las condiciones más

desfavorables que deben ser evaluadas son las condiciones pseudoestática y pseudoestática con filtración.

En coberturas sin reforzamiento, los FS obtenidos para una condición estática son mayores a 1,5 en taludes menores a 3,0H:1V y son mayores a 1,35 en taludes de 2,5H:1V, en ambos casos incluso en alturas mayores a 40 m. En cambio, en condición pseudoestática, el FS requerido se cumple cuando $k_h < 0,10$ en taludes de 2,5H:1V y cuando $k_h < 0,15$ en taludes de 3,0H:1V; para la condición pseudoestática con filtración, si $PSR=0,5$ el valor de FS es mayor a 1,0 cuando $k_h < 0,15$ en taludes de 2,5H:1V y 10 m de altura y cuando $k_h < 0,10$ en taludes de 2,5H:1V y 30 m de altura.

En coberturas reforzadas con geomallas, los FS obtenidos para una condición estática son mayores a 1,5 en taludes menores a 3,0H:1V, independientemente de la altura; en cambio, en taludes de 2,5H:1V los FS son mayores a 1,4 y solo se cumple el FS requerido en alturas menores a 20 m. En condición pseudoestática, el FS requerido se cumple cuando $k_h < 0,10$ en taludes de 2,0H:1V y cuando $k_h < 0,15$ en taludes menores a 2,5H:1V. En condición pseudoestática con filtración, si $PSR=0,5$ el valor de FS es mayor a 1,0 cuando $k_h < 0,15$ en taludes menores a 2,5H:1V con alturas menores a 30 m; y cuando $k_h < 0,10$ en taludes menores a 2,0H:1V con alturas menores a 10 m.

En coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas, los FS obtenidos para una condición estática son mayores a 1,5 en taludes menores a 3,0H:1V, independientemente de la altura; en cambio, en taludes de 2,5H:1V, los FS son mayores a 1,4 y solo se cumple el FS requerido en alturas de hasta 25 m. Asimismo, en taludes menores a 2,0H:1V los valores de FS son mayores a 1,0 y solo se cumple el FS requerido en taludes menores a 10 m. En condición pseudoestática, cuando el talud tiene 10 m de altura el FS requerido se cumple cuando $k_h < 0,15$ en taludes menores a 2,0H:1V y cuando $k_h < 0,10$ en taludes de hasta 1,5H:1V; cuando el talud tiene 30 m de altura el FS requerido se cumple cuando $k_h < 0,15$ en taludes menores a 2,5H:1V. En condición pseudoestática con filtración, en taludes de 10 m de altura, si $PSR=0,5$ el valor de FS es mayor a 1,0 en los mismos casos que se indicaron para una condición pseudoestática, en cambio en taludes de 30 m, ello se cumple cuando $k_h < 0,15$ y los taludes son menores a 2,0H:1V.

Las condiciones de estabilidad indicadas en esta sección son válidas asumiendo que la superficie de deslizamiento es la interfase GM-GCL, lo cual se produce en los escenarios indicados en la Sección 5.3.1.

5.3.5.4 Matriz con condiciones de estabilidad

A partir de los resultados que se describieron en las secciones anteriores, se ha definido una matriz en la que de forma resumida se indican las condiciones con las cuales la estabilidad física en cada sistema de cobertura es favorable en las condiciones de servicio que han sido analizadas, es decir, donde el FS obtenido es mayor al FS mínimo aceptable. La matriz se presenta en la Tabla 5.8. Estas condiciones se han definido en función a la resistencia cortante de la interfase crítica y las medidas de reforzamiento que sean necesarias para garantizar la estabilidad. Asimismo, se ha considerado que la falla podría producirse ya sea por encima o debajo del revestimiento por lo cual también se indican algunas recomendaciones con respecto al sistema de anclaje.

El propósito de la matriz propuesta en este estudio es que constituya una guía de referencia útil para el diseño preliminar de coberturas de cierre. Si bien es cierto que las condiciones que se indican en esta matriz son representativas para coberturas con el espesor (0,60 m) y alturas de talud (10 y 30 m) que han sido consideradas en el presente estudio, estas matrices también son aplicables para coberturas de menor espesor o menor altura dado que para estos casos las condiciones que se indican son relativamente conservadoras por tener FS mayores a los obtenidos para la definición de cada matriz. Asimismo, también podrían ser aplicables en coberturas sobre taludes de mayor altura debido a que la reducción en FS comienza a ser menos significativa de acuerdo con el análisis paramétrico.

Tabla 5.8 Matriz de condiciones de estabilidad para sistemas de cobertura con geomembrana (GM) y revestimiento geosintético de arcilla (GCL).

Talud	Interfase GM-SG (sobre el revestimiento) Sistema de cobertura tipo I y III	Interfase GM-SBP (debajo del revestimiento) Sistema de cobertura tipo I	Interfase GCL-SG (sobre el revestimiento) Sistema de cobertura tipo II	Interfase GM-GCL (debajo del revestimiento) Sistema de cobertura tipo III
1,5H:1V	En taludes de hasta 10 m, se recomienda el uso de geomallas y geoceldas y, al mismo tiempo, que la interfase crítica tenga una resistencia cortante alta. En taludes de hasta 30 m, la geomalla deberá tener una alta rigidez ($K_t > 3000$ kN/m).	Se tienen condiciones de estabilidad desfavorables, por lo tanto, para evitar que la falla de la cobertura se produzca en esta interfase se recomienda que el sistema de anclaje sea con bloques de concreto en zanjas.	La falla no necesariamente se producirá en la interfase GCL-SG. Es probable una falla interna en la cobertura de suelo, por lo tanto, a pesar de la alta resistencia cortante en la interfase, se recomienda el uso de geomallas y geoceldas.	Se tienen condiciones de estabilidad desfavorables, por lo tanto, para evitar que la falla de la cobertura se produzca en esta interfase se recomienda que el sistema de anclaje sea con bloques de concreto en zanjas.
2,0H:1V	Si la interfase tiene una resistencia cortante alta no es necesario reforzamiento incluso en condiciones de servicio severas (p. ej., $k_h < 0,15$ o $PSR < 1,0$). Si la resistencia cortante es similar al promedio, en taludes de 10 m será necesario el uso de geomallas y, en taludes de 30 m, adicionalmente deberá emplearse geoceldas.	Se tienen condiciones de estabilidad favorables incluso sin reforzamiento, por lo tanto, la falla del sistema de cobertura no se producirá a lo largo de esta interfase. En taludes de menor altura (p. ej., 10 m), el sistema de anclaje puede consistir en zanjas con material de relleno. No obstante, en este caso también se debe analizar la estabilidad a través de la interfase del GCL (tejido) con el sustrato de suelo.	No es necesario reforzamiento. Se tienen condiciones de estabilidad favorables en diferentes condiciones de servicio debido a la alta resistencia cortante en las interfases con GCL (lado no tejido). El anclaje de los geosintéticos puede consistir en zanjas con material de relleno. No obstante, debe analizarse la estabilidad a través de la interfase del GCL (tejido) con el sustrato de suelo.	En coberturas sin reforzamiento se tienen condiciones estables si $k_h < 0,10$. En condiciones más severas, es necesario el reforzamiento con geomallas en taludes de menor altura y geoceldas en taludes de mayor altura en ambos casos se recomienda que el sistema de anclaje sea con bloques de concreto en zanjas.
2,5H:1V				
3,0H:1V				
3,5H:1V	Con la resistencia cortante promedio en la interfase se tienen condiciones de estabilidad favorables cuando $k_h < 0,15$ o $PSR < 0,5$. En condiciones de servicio más severas, es recomendable el uso de geomallas o una alta resistencia cortante en la interfase.			Se tienen condiciones de estabilidad favorables incluso sin reforzamiento, por lo tanto, la falla del sistema de cobertura no se producirá a lo largo de esta interfase. En taludes de menor altura, el sistema de anclaje puede consistir en zanjas con material de relleno. No obstante, en este caso también se debe analizar la estabilidad a través de la interfase del GCL (lado tejido) con el sustrato de suelo.

Abreviaturas:

- k_h : Coeficiente sísmico horizontal.
 PSR : Relación entre h_w y h (*parallel submergence ratio*).
 K_t : Rigidez axial a la tensión.

5.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA PROBABILÍSTICO

La estabilidad física en sistemas de cobertura también ha sido analizada con un enfoque de diseño probabilístico basado en la teoría de confiabilidad, mediante la aplicación del método de simulación de Monte Carlo (MSMC) que fue descrito en la Sección 5.1.2 y el método analítico propuesto por Koshand *et al.* (2018) descrito en la Sección 5.1.1. Los criterios, procedimientos y resultados obtenidos de este análisis se describen en la presente sección.

5.4.1 Variables aleatorias y parámetros estadísticos

La variabilidad de los parámetros de diseño ha sido incluida en el análisis probabilístico a través de variables aleatorias considerando una distribución de probabilidad normal en todos los casos. Se ha considerado este tipo de distribución porque es característica en la mayoría de parámetros. Los parámetros estadísticos considerados para cada variable aleatoria fueron los siguientes.

5.4.1.1 Parámetros obtenidos a partir de ensayos

La variabilidad en estos parámetros se debe a que los ensayos de laboratorio a menudo están sujetos a múltiples factores que pueden influir en su exactitud y uniformidad de sus resultados, tales como: el muestreo de material, la experiencia del personal de laboratorio, las características del equipo empleado, errores en el registro de datos, entre otros aspectos.

La forma adecuada de evaluar la variabilidad de los resultados en estos ensayos es realizando ensayos de laboratorio con fines de confiabilidad, es decir, realizando una cantidad de ensayos aceptable estadísticamente, en condiciones similares (con los mismos materiales, equipos de ensayo, personal de laboratorio, entre otros aspectos), y a partir del conjunto de resultados que se obtengan determinar los parámetros estadísticos representativos.

a. Resistencia cortante en la interfase

Existen múltiples factores que influyen en la obtención de los parámetros de resistencia cortante, los cuales fueron descritos detalladamente en la Sección 2.6.4. Con el propósito de cuantificar su variabilidad, Criley y Saint Jhon (1997) y Sia y Dixon (2007) realizaron múltiples ensayos de resistencia cortante

en interfases GM-SG y GM-SBP. Los coeficientes de variación para ángulos de fricción pico y residual que se obtuvieron en estos estudios se encuentran en el rango de 4 y 10 %. Por lo tanto, en base a ello, en el presente estudio se ha considerado un coeficiente de variación de 10 % para el ángulo de fricción bajo un criterio conservador. La adhesión aparente en la interfase no ha sido considerada bajo este mismo criterio por tener una variabilidad alta.

b. Propiedades del suelo

Los coeficientes de variación para las propiedades del suelo se han definido en base a los valores propuestos por Duncan (2000) correspondientes a un número considerable de ensayos. De acuerdo a ello, se ha considerado un coeficiente de variación de 5 % para el peso específico total y el peso específico saturado del suelo, y un coeficiente de variación de 10 % para el ángulo de fricción interna. No se ha considerado la cohesión interna del suelo ya que el material de la capa de drenaje es un suelo granular.

5.4.1.2 Geometría de la cobertura

Parámetros como el espesor de la cobertura de suelo y la altura del talud también presentan un margen de error. La configuración definitiva de la geometría de la cobertura nunca será exactamente igual a la indicada en el diseño, incluso durante el control de calidad de la ejecución de los trabajos se suele considerar un nivel de tolerancia aceptable. No obstante, un adecuado control topográfico podría contribuir a resultados más precisos. En base a ello, se ha considerado de forma conservadora un coeficiente de variación de 5 % para ambos parámetros.

5.4.1.3 Condiciones de servicio

El nivel de carga hidráulica y el coeficiente sísmico no pueden ser consideradas como variables aleatorias debido a que constituyen escenarios específicos de análisis. En el diseño suelen considerarse los más críticos. En el caso del PSR, dependiendo del criterio y grado de conservadurismo considerado por el diseñador, puede considerarse una saturación parcial o total de la capa de drenaje. Asimismo, en el caso de k_h , la definición de este parámetro ya considera criterios y métodos específicos, tal como se ha descrito en la Sección 3.3.

5.4.1.4 Rigideces axiales en la cobertura

Las rigideces axiales a la compresión y tensión no han sido consideradas como variables aleatorias, ello debido a que en el caso de K_C esta variable depende del espesor de la cobertura cuya variabilidad ya ha sido considerada. Asimismo, en el caso de K_T , usualmente el diseño ya considera la aplicación de factores de reducción, específicamente para la tensión última, tal como se ha descrito en la Sección 3.4.5. Por lo tanto, considerar K_C y K_T como variables aleatorias resultaría un criterio excesivamente conservador y de considerarse necesario debería realizarse previamente un estudio de sensibilidad para identificar el tipo de distribución de probabilidad y definir los parámetros estadísticos correspondientes.

En base a lo indicado en los párrafos anteriores, en la Tabla 5.9 se presenta un resumen de los parámetros estadísticos de las variables aleatorias consideradas en el análisis probabilístico, así como los valores considerados en las demás variables.

Tabla 5.9 Parámetros estadísticos de las variables de diseño consideradas en el MSMC.

Variable de análisis	Símbolo	Unidad	Promedio (μ)	Coefficiente de variación, V (%)
Resistencia cortante de la interfase				
Adhesión	α	kPa	-	-
Ángulo de fricción	δ	(°)	(*)	10
Propiedades del suelo de la cobertura				
Peso específico no saturado	γ_d	kN/m ³	18	5
Peso específico saturado	γ_{sat}	kN/m ³	20	5
Cohesión	c_p	kPa	-	-
Ángulo de fricción	φ	(°)	30	10
Características geométricas				
Espesor	h_C	m	0,60	5
Altura	H	m	10 - 30	5
Talud de superficie	$H:V$	-	1,5H:1V - 3,5H:1V	-
Condiciones de servicio				
Nivel de carga hidráulica	$h: h_w$	-	0,50	-
Coefficiente sísmico horizontal	k_h	-	0,10	-
Variables asociadas al cálculo de tensión en geosintéticos				
Rigidez axial en tensión	K_T	kN/m	1500 - 3000	-
Rigidez axial en compresión	K_C	kN/m	150 - 300	-

(*) Los ángulos de fricción han sido obtenidos mediante procesos iterativos hasta alcanzar los índices de confiabilidad objetivo (ver Sección 5.4.2).

5.4.2 Generación de ábacos con índices de confiabilidad

A diferencia del análisis determinístico donde se definieron matrices con condiciones de estabilidad para cada sistema de cobertura, el principal propósito de realizar un análisis probabilístico ha sido obtener ábacos de diseño con índices

de confiabilidad (β_N). De acuerdo con lo descrito en la Sección 2.7.2, los índices de confiabilidad representan una escala sencilla de interpretar y permiten un mejor análisis de la distribución de probabilidad de FS con respecto a la función de estado límite definida.

En los ábacos propuestos, los valores de β_N están asociados a un ángulo de fricción, una inclinación de talud y condiciones de servicio con sismo o filtración de agua. Asimismo, se han considerado coberturas con y sin reforzamiento. Estos ábacos resultan aplicables en múltiples escenarios; por ejemplo: si se requiere un índice de confiabilidad específico para validar el diseño, se podría estimar cuál es el ángulo de fricción requerido en la interfase y, a partir de ello, definir los materiales que serán empleados en la cobertura; de igual forma, si ya se conoce el ángulo de fricción en la interfase con los materiales disponibles en la zona, se podría estimar cuál es el índice de confiabilidad en estas condiciones y, en el caso de que este valor resulte menor al mínimo requerido, se podría estimar cuál es la inclinación o tipo de reforzamiento necesario para que las condiciones de estabilidad sean favorables.

Los valores objetivo de β_N que se consideraron en el análisis fueron: 3,0, 2,0, 1,0 y 0,5, en los cuales en promedio se obtuvieron probabilidades de falla de 0,03 %, 1,6 %, 15 % y 30 %, respectivamente. No se han considerado valores de β_N mayores a 3,0 debido a que al estar asociados a probabilidades de falla prácticamente nulas requieren valores muy grandes en el ángulo fricción de la interfase o tensión de reforzamiento, así como inclinaciones de talud bastante extendidas, lo cual es inaplicable. Por otro lado, no se han considerado valores de β_N menores a 0,5 debido a que están al estar asociados a probabilidades de falla demasiado altas no se garantizaría la confiabilidad del diseño. Las Figuras 5.23 y 5.24 muestran las funciones de densidad y probabilidad para FS , obtenidas de simulaciones realizadas en el presente estudio donde se cumplen los valores de β_N propuestos. En estas figuras se observa el contraste entre las diferentes distribuciones de probabilidad del FS obtenidas en función de β_N .

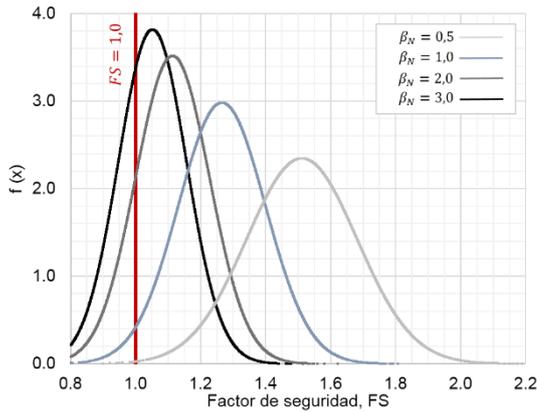


Figura 5.23 Función de densidad del FS obtenida de simulaciones realizadas en el presente estudio.

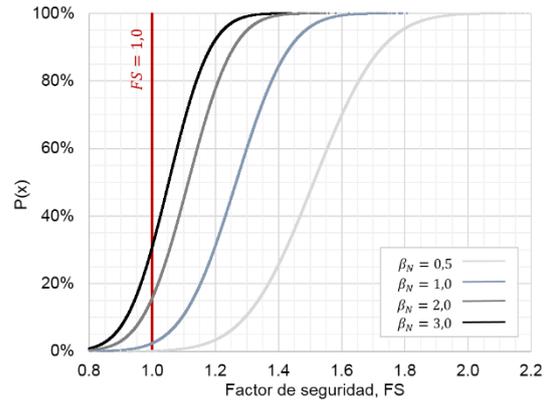


Figura 5.24 Función de probabilidad del FS obtenida de simulaciones realizadas en el presente estudio.

5.4.3 Presentación y discusión de resultados

5.4.3.1 Coberturas sin reforzamiento

Los ábacos con índices de confiabilidad (β_N) para coberturas sin reforzamiento obtenidos para condiciones de servicio con sismo y filtración se presentan en las Figuras 5.25 (a) y (b), respectivamente. En estas figuras se observa que la diferencia en el ángulo de fricción requerido (δ) para alcanzar un β_N específico en coberturas de 10 y 30 m de altura no es significativa, siendo apenas 1° en la mayoría de los casos.

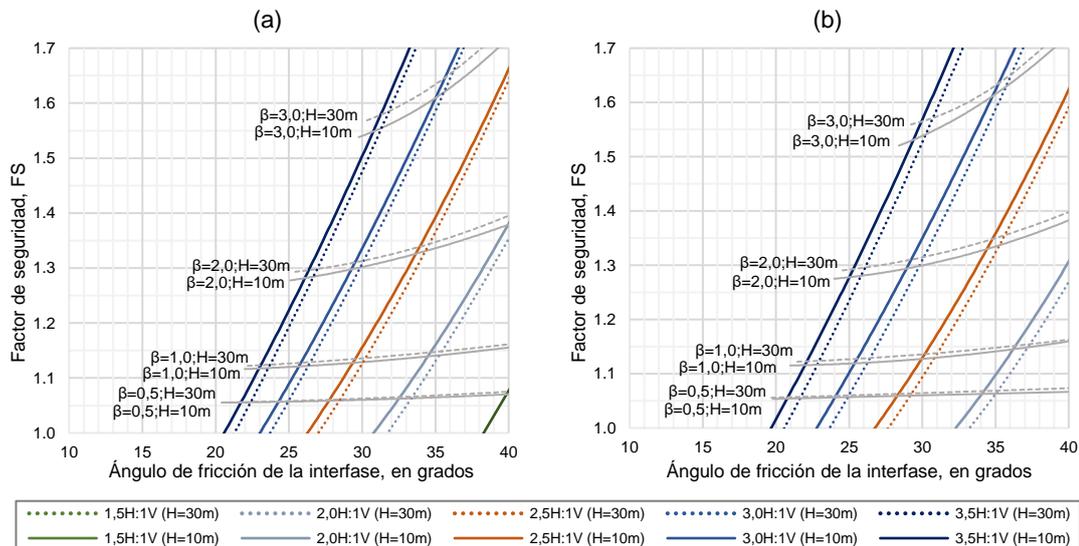


Figura 5.25 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas sin reforzamiento en condiciones de servicio (a) con sismo y (b) filtración.

En los resultados que se presentan se observa que en inclinaciones de talud de 1,5H:1V se requiere que $\delta > 40^\circ$ incluso para valores de β_N menores a 0,5 lo cual

resulta inaplicable en la práctica, por lo tanto, para esta inclinación de talud no basta con la resistencia proporcionada por la interfase y la aplicación de reforzamiento es necesaria para garantizar su estabilidad física. Por otro lado, en taludes de 2,0H:1V, se requiere que δ sea mayor a 32° para alcanzar al menos un β_N de 0,5 ($P_f \cong 30\%$), este ángulo de fricción es mayor al máximo obtenido (26°) en los ensayos LSDS para la interfase GM-SG, por lo tanto, para este caso es preferible que el revestimiento sea con GCL. Asimismo, al considerar 26° en el ángulo de fricción para coberturas sobre taludes de 2,5H:1V y 3,0H:1V, se obtendrían valores de β_N iguales a 1,0 ($P_f \cong 15\%$) y 2,0 ($P_f \cong 1,6\%$), respectivamente. En cambio, si la interfase fuera con GCL, al tener ángulos de fricción mayores a 30° se prevé que se los valores de β_N incluso podrían resultar superiores a 3,0 ($P_f \cong 0,03\%$).

Si β_N es menor a 1,0 ($P_f \cong 15\%$), en coberturas sin reforzamiento una variación entre 1° y 2° en el ángulo de fricción promedio podría reducir el índice de confiabilidad a 0,5 y, por consiguiente, incrementar la probabilidad de falla hasta 30%. En cambio, para reducir β_N en una unidad, cuando β_N es igual a 2,0 y 3,0 es necesaria una reducción de hasta 3° y 5° , respectivamente. Por lo tanto, la reducción de la confiabilidad del diseño, medida en términos de β_N , es más susceptible a la variación de δ cuando $\beta_N < 1,0$. En la Tabla 5.10 se indican los valores de δ mínimos que se requieren para diferentes alturas, inclinaciones de talud y condiciones de servicio en función del valor de β_N requerido. En esta tabla solo se han considerado valores de $\delta < 40^\circ$.

Tabla 5.10 Ángulos de fricción mínimos necesarios para índices de confiabilidad específicos en coberturas sin reforzamiento.

Altura	Inclinación de talud	Ángulos de fricción mínimos							
		β_N en condición sísmica ($k_h=0,1$)				β_N en condición con filtración (PSR=0,5)			
		0,5	1,0	2,0	3,0	0,5	1,0	2,0	3,0
H=10m	1,5H:1V	-	-	-	-	-	-	-	-
	2H:1V	32	34,5	-	-	34	36	-	-
	2,5H:1V	28	29,5	34	-	28	30	34	-
	3H:1V	24	26	29	35	24	26	29	35
	3,5H:1V	22	23	26	31	21	22	25	29
H=30m	1,5H:1V	-	-	-	-	-	-	-	-
	2H:1V	33,5	35,5	-	-	35	37	-	-
	2,5H:1V	28,5	30,5	34,5	-	29	31	36	-
	3H:1V	25	26,5	30	36	25	27	30	36
	3,5H:1V	22,5	24	27	32	22	23	26	31

5.4.3.2 Coberturas reforzadas con geomallas

Los ábacos con índices de confiabilidad (β_N) para coberturas reforzadas con geomallas que han sido obtenidos para condiciones de servicio con sismo y filtración se presentan en las Figuras 5.26 (a) y (b), respectivamente. En estos ábacos se observa que la diferencia en el ángulo de fricción requerido para alcanzar un β_N específico en coberturas de 10 y 30 m de altura, es aproximadamente 2° y 3° para taludes de 3,5H:1V y 1,5H:1V, respectivamente; esta diferencia es menor en condición sísmica.

En los resultados que se presentan se verifica que a través del uso de geomallas la confiabilidad del diseño, medida en términos de β_N , puede mejorarse con un ángulo de fricción menor en 1° a 5° que el requerido en coberturas sin reforzamiento, dependiendo de las condiciones de cada caso. Por ejemplo, en un talud de 2,5H:1V, para que se obtengan valores de β_N iguales o mayores a 1,0 y 2,0 basta que δ sea mayor a 27° y 31° , respectivamente, mientras que en coberturas sin reforzamiento se requiere que δ sea mayor a 30° y 34° . Por otro lado, se verifica que la reducción de la confiabilidad del diseño en coberturas reforzadas con geomallas, medida en términos de β_N , también es muy susceptible a la variación de δ cuando $\beta_N < 1,0$.

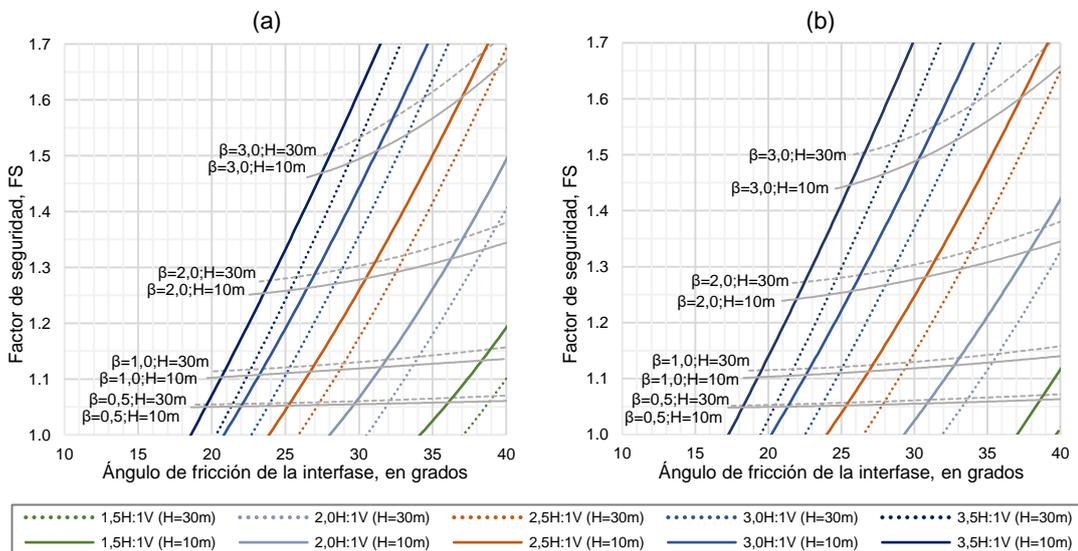


Figura 5.26 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas reforzadas con geomallas en condiciones de servicio (a) con sismo y (b) filtración.

En la Tabla 5.11 se indican los valores de δ mínimos que se requieren para diferentes alturas, inclinaciones de talud y condiciones de servicio en función del valor de β_N requerido. En esta tabla no se han considerado valores de $\delta > 40^\circ$.

Tabla 5.11 Ángulos de fricción mínimos necesarios para índices de confiabilidad específicos en coberturas reforzadas con geomallas.

Altura	Inclinación de talud	Ángulos de fricción mínimos							
		β_N en condición sísmica ($k_h=0,1$)				β_N en condición con filtración (PSR=0,5)			
		0,5	1,0	2,0	3,0	0,5	1,0	2,0	3,0
H=10m	1,5H:1V	36	38	-	-	38,5	-	-	-
	2H:1V	29,5	31,5	36	-	31	33	38	-
	2,5H:1V	25	27	31	37	25,5	27	31	37
	3H:1V	22	23	26,5	31	21,5	22,5	26	30
	3,5H:1V	19,5	21	23,5	27,5	18	19	22	26
H=30m	1,5H:1V	39	-	-	-	-	-	-	-
	2H:1V	32	34	39,5	-	33,5	35,5	-	-
	2,5H:1V	27,5	29	32,5	39,5	28	29,5	34	-
	3H:1V	24	25,5	29	34	24	25	28,5	34
	3,5H:1V	21,5	23	26	30	20,5	22	25	29

5.4.3.3 Coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas

Los ábacos con índices de confiabilidad (β_N) para coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas para alturas de 10 y 30 m, en condiciones de servicio con sismo y filtración, se presentan en las Figuras 5.27 (a) y (b) y Figuras 5.28 (a) y (b), respectivamente. En los ábacos que se presentan se observa que la diferencia en el ángulo de fricción requerido para alcanzar un β_N específico en coberturas de 10 y 30 m, es aproximadamente 4° y 8° para taludes de 3,5H:1V y 1,5H:1V, respectivamente, las cuales son mayores a las obtenidas para coberturas sin reforzamiento y coberturas reforzadas con geomallas.

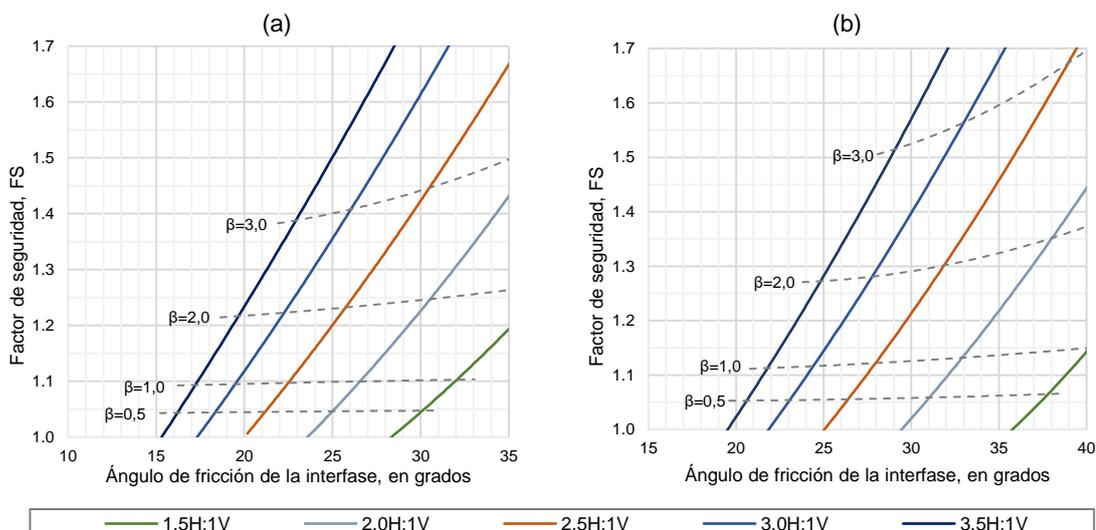


Figura 5.27 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas en condición de servicio con sismo, para (a) H=10 m y (b) H=30 m.

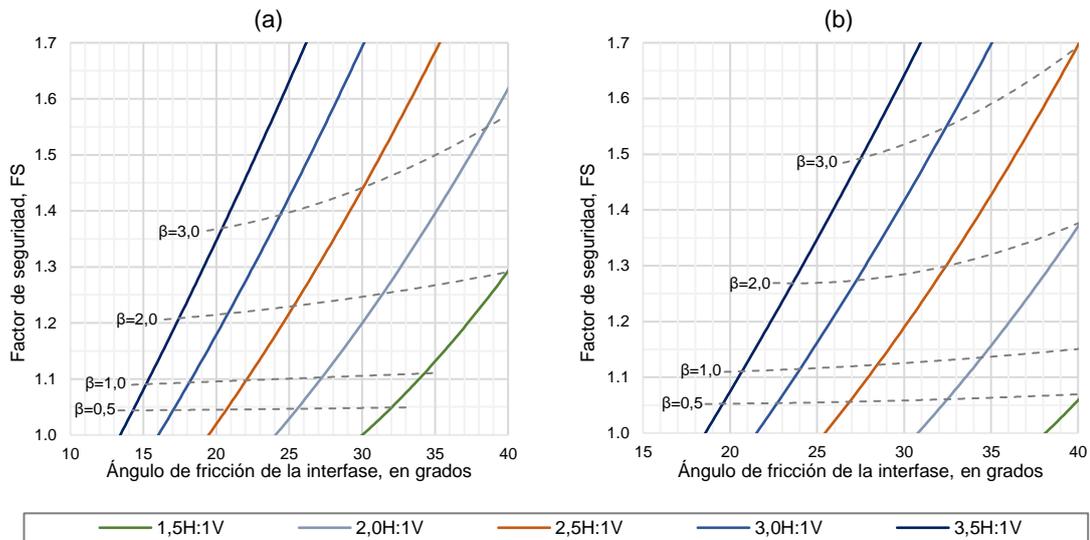


Figura 5.28 Ábacos con índices de confiabilidad para coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas en condición de servicio con filtración, para (a) H=10 m y (b) H=30 m.

En los resultados también se verifica que, mediante el reforzamiento con geomallas y geoceldas, los ángulos de fricción requeridos para alcanzar un β_N específico son menores en 2° a 9° que los requeridos en coberturas sin reforzamiento. Por ejemplo, para un talud de 2,5H:1V y 10 m de altura, si la cobertura cuenta con reforzamiento con geomalla y geocelda se requiere que δ sea al menos $22,5^\circ$ para alcanzar un β_N igual a 1,0, mientras que en coberturas sin reforzamiento y coberturas reforzadas con geomallas se requiere que δ sea mayor a 27° y 30° , respectivamente. En la Tabla 5.12 se indican los valores de δ mínimos que se requieren para diferentes alturas, inclinaciones de talud y condiciones de servicio en función del valor de β_N requerido. En esta tabla no se han considerado valores de $\delta > 40^\circ$.

Tabla 5.12 Ángulos de fricción mínimos necesarios para índices de confiabilidad específicos en coberturas reforzadas con geomallas y geoceldas.

Altura	Inclinación de talud	Ángulos de fricción mínimos							
		β_N en condición sísmica ($k_R=0,1$)				β_N en condición con filtración (PSR=0,5)			
		0,5	1,0	2,0	3,0	0,5	1,0	2,0	3,0
H=10m	1,5H:1V	30	32	-	-	32	34	40	-
	2H:1V	25	26,5	30,5	-	25,5	27	31,5	38,5
	2,5H:1V	21,5	22,5	26	30,5	20,5	22	25,5	30
	3H:1V	18,5	19,5	22,5	26	17	18,5	21	24,5
	3,5H:1V	16,5	17,5	19,5	23	14	15	17,5	20,5
H=30m	1,5H:1V	38	40	-	-	-	-	-	-
	2H:1V	31	33	38	-	32,5	34,5	40	-
	2,5H:1V	26,5	28	32	39	27	28,5	32,5	40
	3H:1V	23	24,5	28	33	23	24	27,5	32,5
	3,5H:1V	20,5	22	25	29	19,5	21	23,5	27,5

5.4.3.4 Relación entre el factor de seguridad y el índice de confiabilidad

De acuerdo a lo descrito en la Sección 2.7, una selección lógica y justificada del factor de seguridad aceptable puede realizarse mediante la aplicación del enfoque de diseño basado en la teoría de confiabilidad. Por lo tanto, en los ábacos propuestos también se ha analizado la relación entre FS y β_N . A partir de ello, se ha verificado que un valor específico de β_N puede estar asociado a diferentes factores de seguridad, lo cual refuerza la premisa de que la definición del valor de FS mínimo aceptable para el diseño dependerá de cada caso de análisis.

En ambas condiciones de servicio, se verifica que para un mismo valor de β_N la variación de FS en función de δ es mínima cuando este último es igual a 0,5 y 1,0, en estos casos FS tiende a ser igual o mayor a 1,05 y 1,10, respectivamente. En cambio, esta variación es más significativa cuando $\beta_N > 2,0$, donde la tendencia es lineal y FS se encuentra en el rango de 1,2 a 1,4; asimismo, si $\beta_N > 3,0$ la tendencia es prácticamente exponencial y se verifica que $FS > 1,35$. Por lo tanto, si en el diseño de coberturas el valor de FS mínimo considerado es igual a 1,0 en condición sísmica y 1,3 en una condición con filtración, estos valores estarían asociados en promedio a índices de confiabilidad de 1,0 ($P_f \cong 15\%$) y 2,0 ($P_f \cong 1,6\%$), respectivamente.

Es importante indicar que en condiciones de estabilidad críticas donde la inclinación de talud es más pronunciada (p. ej., 1,5H:1V), se requieren valores de FS más altos para alcanzar un valor de β_N o P_f específico. Por lo tanto, si no se evalúa y define adecuadamente el valor del FS mínimo aceptable podría estar validándose condiciones donde la estabilidad física de la cobertura tiene una probabilidad de falla alta, lo cual no garantizaría su desempeño adecuado.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados del presente estudio, a continuación, se resaltan las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con el análisis paramétrico se verifica que las variables que afectan significativamente la estabilidad del sistema de cobertura son la inclinación del talud, la fuerza sísmica y el nivel de agua. La reducción del FS por el incremento en la inclinación de talud es diferente dependiendo de otras variables de análisis. Un incremento de 0,5H:1V origina una reducción del FS en el rango de 0,1 a 0,33. Asimismo, en condición sísmica, la reducción del FS puede ser mayor al 50 % del valor calculado en condición estática; y en condición con filtración, un incremento de 0,1 en PSR puede reducir hasta en 0,1 el valor del FS .
- La adhesión aparente (α) y el ángulo de fricción (δ) de la interfase son los parámetros principales que contribuyen en la estabilidad física de la cobertura. En el caso analizado, un incremento de una unidad en δ y α , puede incrementar hasta en 0,10 y 0,34 el valor del FS , respectivamente. El incremento del FS es menos significativo a medida que el talud es más empinado. A partir de estos resultados se concluye que una estimación inadecuada de estos parámetros podría subestimar o sobrestimar significativamente el valor del FS .
- El análisis de estabilidad de la cobertura considerando un talud infinito podría subestimar el valor del FS hasta en 0,20. Se ha verificado que la variación en el FS es mínima cuando la relación entre la longitud y el espesor (L/h_c) es mayor a 100. Asimismo, el valor del FS en alturas menores a 10 m es significativamente mayor que en alturas mayores a 30 m.
- Las propiedades de la cobertura de suelo tales como el peso específico, la cohesión interna y el ángulo de fricción tienen una influencia menor en la estabilidad física, ello debido a que el modelo analítico asume que la superficie de falla no atraviesa la cobertura de suelo.
- La evaluación precisa de la tensión en el geosintético (T_{gs}) es muy importante a fin de contar con un diseño confiable, más aun teniendo en cuenta que las

coberturas reforzadas son construidas en taludes muy empinados y de gran altura. El valor de T_{gs} obtenido para un talud de 1,5H:1V es entre 6 a 10 veces la tensión necesaria para un talud de 3,0H:1V. Asimismo, el reforzamiento es más efectivo en coberturas sobre taludes de gran altura cuando la pendiente es baja y en coberturas sobre taludes empinados cuando la altura es menor.

- La estimación del valor de T_{gs} mínimo para alcanzar un FS aceptable no es suficiente en la evaluación del reforzamiento, también es necesario evaluar si esta tensión realmente se genera en la geomalla debido a que este material tiene un comportamiento pasivo. El valor de T_{gs} está en función de la relación entre las rigideces axiales a la compresión (K_C) y tensión (K_T) de la cobertura. La columna podría actuar predominantemente en tensión si la relación K_C/K_T es muy baja o predominantemente en compresión si esta relación es muy alta. El incremento en FS comienza a ser significativo cuando $K_C/K_T < 1,0$.
- Mediante la evaluación de la compatibilidad de deformaciones en el análisis de estabilidad, se ha verificado que la tensión desarrollada en los geosintéticos podría ser insignificante o, por el contrario, podría exceder la tensión última del material. Por lo tanto, el diseño de coberturas no debería ser realizado con métodos de análisis que no consideren este criterio porque habría incertidumbre con respecto a si el diseño resulta inadecuado o conservador.
- El identificar los tramos de compresión y tensión en la cobertura permite evaluar aquellos tramos donde realmente se requiere reforzamiento. Si la geomalla es colocada a lo largo de toda la cobertura ello no necesariamente contribuye en la estabilidad física. La longitud de la cobertura en tensión es mayor al 50 y 75 % de la longitud total cuando la relación K_C/K_T es menor a 1,0 y 0,1, respectivamente.
- El método aplicado para el análisis de estabilidad en el presente estudio es un método más riguroso en comparación a métodos de análisis tradicionales que no toman en cuenta la compatibilidad de deformaciones axiales en los elementos en tensión (geosintéticos) y elementos en compresión (cobertura de suelo) del sistema de cobertura.

- En sistemas de cobertura compuestos por dos o más capas de geosintéticos, no solo debe evaluarse la estabilidad de la cobertura en la interfase entre el suelo granular y el geosintético colocado debajo, todas las superficies probables de deslizamiento deben ser analizadas, sobre todo las interfaces entre dos geosintéticos ya que presentan una resistencia cortante menor.
- Se ha analizado la estabilidad de sistemas de cobertura con geomembrana o GCL bajo un enfoque determinístico, considerando múltiples escenarios con o sin reforzamiento (con geomallas y geoceldas). En base a ello, se ha propuesto una matriz con condiciones de estabilidad. Se ha verificado que el uso de geomallas y geoceldas es necesario en sistemas de cobertura sobre taludes más empinados que 2,0H:1V, incluso en coberturas solo con GCL. En este caso, aunque la interface GCL-SG tiene la resistencia cortante más alta en comparación a otras interfaces, la falla podría ocurrir dentro de la cobertura de suelo. La matriz propuesta también proporciona criterios para el reforzamiento de sistemas de cobertura en taludes de diferente inclinación. Asimismo, en la matriz también se consideran fallas por debajo del revestimiento, las cuales a menudo no son evaluadas en el diseño de coberturas, en estos casos se ha indicado el tipo de anclaje que es aplicable. Se espera que estas recomendaciones sean consideradas en futuros diseño de coberturas de cierre con geosintéticos para proyectos mineros.
- Las coberturas con geomembrana tienen mayores limitaciones en la estabilidad física, mientras que las coberturas con GCL presentan FS adecuados incluso en condiciones de servicio muy desfavorables, no obstante, su desempeño a largo plazo debe ser evaluado en función a las condiciones específicas de cada proyecto, específicamente con relación a la activación hidráulica de la bentonita, la degradación del geotextil y la degradación del reforzamiento interno.
- A partir de un análisis probabilístico se han propuesto ábacos de diseño con índices de confiabilidad para sistemas de cobertura con y sin reforzamiento. El uso de estos ábacos permite definir de forma justificada el valor de FS mínimo de diseño a través de un índice de confiabilidad que considera la variabilidad e incertidumbre inherente en los parámetros de análisis. El valor de FS debe ser definido o verificado en cada caso de estudio, debido a que en

algunos casos incluso un FS igual a 1,5 podría dar lugar a un diseño inseguro. El presente estudio es un paso para que el diseño basado en la confiabilidad sea una práctica cada vez más común en el análisis de estabilidad de estructuras geotécnicas por su importancia y las ventajas significativas que brinda.

RECOMENDACIONES

En base a los resultados y conclusiones del presente estudio, a continuación, se indican algunas recomendaciones para investigaciones afines futuras:

- Incorporar el enfoque de diseño basado en la confiabilidad como una práctica común en el análisis de estabilidad, no solo en el diseño de coberturas, sino también en otro tipo de estructuras geotécnicas.
- Complementar el presente estudio considerando el uso de geocompuestos de drenaje en lugar de material granular, como una alternativa que permita reducir la altura del nivel de agua y, por consiguiente, también sus efectos negativos en la estabilidad física de la cobertura.
- Se recomienda evaluar la resistencia cortante de interfases con otro tipo de geosintéticos (p. ej., geotextiles o geocompuestos de drenaje) y otro tipo de materiales (p. ej., relaves gruesos o desmonte de mina), con la finalidad de evaluar la estabilidad de sistemas de cobertura de diferente configuración.
- Realizar más estudios que permitan evaluar y estimar la degradación de las propiedades de los geosintéticos frente a diferentes condiciones ambientales a corto o largo plazo, específicamente con relación a su durabilidad, conductividad hidráulica y resistencia cortante ya sea interna (en el caso del GCL) o con materiales adyacentes.
- El uso de prototipos a escala permitiría evaluar directamente la estabilidad de sistemas de cobertura en diferentes condiciones de servicio. Por lo tanto, es recomendable su aplicación. Asimismo, se recomienda que estos prototipos cuenten con sensores para estimar las cargas de tensión desarrolladas en los geosintéticos con la finalidad de contrastar estos resultados con los obtenidos mediante métodos analíticos.
- Se recomienda complementar y contrastar la estabilidad de la cobertura considerando diferentes formas en el nivel de agua. El presente análisis se ha realizado en base al escenario más frecuente donde el nivel de agua se distribuye paralelamente al talud; no obstante, dependiendo de la intensidad y duración de la precipitación podrían presentarse distintas formas en los niveles de agua, cada una con efectos distintos en la estabilidad de la cobertura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aduvire, O. "Drenaje ácido de mina - Generación y tratamiento". Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Madrid, 2006.
2. Akcil, A. & Koldas, S. "Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies". *Journal of Cleaner Production*, 1139-1145. 2006.
3. Al-Omari, R. & Fekheraldin, M. "Measurement of tensile properties of geogrids". *Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*. Kuala, 2012.
4. Aramburo, M. & Olaya, Y. "Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia". *Revista Gestión y Ambiente*, 15 (3), 125-133. 2012.
5. ASTM D4439. "Standard terminology for geosynthetics". *American Society for Testing and Materials*. West Conshohocken.
6. ASTM D5321. "Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method". *American Society for Testing and Materials*. Philadelphia.
7. ASTM D6243. "Standard test method for determining the internal and interface shear resistance of geosynthetic clay liner by the direct shear method". *American Society for Testing and Materials*. West Conshohocken.
8. Asu-Wusu, C. & Yanful, E. "Post-closure investigation of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine", *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 496-506. Ontario, 2007.
9. Aubertin, M.; Bussiere, B.; Pabst, T.; James, M. & Mbonimpa, M. "Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites". *Geo-Chicago*. Illinois, 2016.
10. Ayala, R. & Huallanca, W. (2014). "Interface shear strength non linearity and its effects on heap leach pad block failure stability". *Proceedings of Heap Leach Solutions*. Lima, 2014.
11. Bacas, B.; Cañizal, J. & Konietzky, H. "Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 638-645. 2015.

12. Beltrán-Rodríguez, L.; Larrahondo, J. & Cobos, D. "Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia". *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 44, 5-20. 2018.
13. Bergado, D.; Ramana, G.; Sia, H. & Varun. "Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand". *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 371-393. 2006.
14. Blumel, W. & Stoewahse, C. "Geosynthetic interface friction testing in Germany: effect of test setups". *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, 209-216. 1998.
15. Bonaparte, R.; Gross, B.; Daniel, D.; Koerner, R. & Dwyer, S. "Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers". *United States Environmental Protection Agency (EPA), Office of Solid Waste and Emergency Response*. Washington, 2004.
16. Bouazza, A. "Geosynthetic clay liners". *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 3-17. 2002.
17. Breitenbach, A. & Smith, M. "Overview of geomembrane history in the mining industry". *Proceedings of the Eight International Conference on Geosynthetics*. 345-349. Yokohama, 2006.
18. Cárdenas, J. "Plan de abandono de depósitos de relave en la zona de Casapalca", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2001.
19. Chaparro, L. "Drenajes ácidos de mina - Formación y manejo". *ESAICA*, 1, 53-57. 2015.
20. Chen, Y. & Bin Zhu, D. "Controlling strain in geosynthetic liner systems used in vertically expanded landfills". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1, 48-55. 2009.
21. Chiu, P. & Fox, P. "Internal and interface shear strengths of unreinforced and needle-punched geosynthetic clay liners". *Geosynthetics International*, 3, 176-199. 2004.
22. Choudhary A. & M. Krishna. "Experimental investigation of interface behaviour of different types of granular soil/geosynthetics". *Journal of Geosynthetic and Geoenvironmental Engineering*, 2, 1-11. Suiza, 2016

23. Criley, K. & Saint John, D. "Variability analysis of soil vs. geosynthetic interface friction characteristics by multiple direct shear testing". *Proceedings of Geosynthetics*, 885-897. 1997.
24. Datta, M. "Slope stability of cover systems of hazardous waste landfills". *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. India, 2009.
25. Dixon, N. "Soil-geosynthetic interaction: Interface behaviour". *Proceedings 9th International Conference on Geosynthetics*, 563-582. 2010.
26. Dixon, N.; Jones, D. & Fowmes, G. "Interface shear strength variability and its use in reliability based landfill stability analysis". *Geosynthetics International*, 1-14. 2006.
27. Dold, B. "Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings". *Minerals Journal*, 4, 621-641. 2014.
28. Duncan, M. "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 307-316. 2000.
29. Echeverri, L.; Acevedo, E. & Hernandez, F. "Comparación de pruebas de normalidad". XXV Simposio Internacional de Estadística. Armenia, 2015.
30. Feng, S.J. & Gao, L-Y. "Seismic stability analyses for landfill cover systems under different seepage buildup condition". *Environmental Earth Sciences*, 381-391. 2012.
31. Feng, S.J.; Ai, S-G. & Huang, R.Q. "Stability analysis of landfill cover systems considering reinforcement". *Environmental Earth Sciences*, 75:303. 2016.
32. Fox, P. & Stark, T. "State of the art report: GCL shear strength and its measurement - ten year update". *Geosynthetics international*, 22 (1), 3-47. 2015.
33. Fox, P.; Rowland, M. & Scheithe, J. "Internal shear strength of three geosynthetic clay liners". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (10), 933-944. 1997.
34. Foye, K. "Armored geomembrane cover engineering". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(6), 2240-2264. 2011.

35. Geosynthetic Research Institute. "GRI-GM13: *Test methods, test properties and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes*". California, 2016.
36. Geosynthetic Research Institute. "GRI-GM17: *Test methods, test properties and testing frequency for linear low density polyethylene (LLDPE) smooth and textured geomembranes*". California, 2015.
37. Geosynthetic Research Institute. "GRI-GCL5: *Design considerations for geosynthetic clay liners (GCL's) in various applications*". California, 2013.
38. Geosynthetic Research Institute. "GRI-GCL3: *Test methods, required properties, and testing frequencies of geosynthetic clay liners (GCL's)*". California, 2016.
39. Geosynthetic Research Institute. "GRI-GG4(a): *Determination of the long-term design strength of stiff geogrids*". California, 2012.
40. Geosynthetic Research Institute. "GRI-GG4(b): *Determination of the long-term design strength of flexible geogrids*". California, 2012.
41. Gilbert, R., Fernandez, F. & Horsfield, D. "*Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner*". *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (4), 259–266. 1996.
42. Giroud, J.; Darrasse, J. & Bachus, R. "*Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interface shear strength*". *Geotextiles and Geomembranes*, 12, No. 3, 275–286. 1993.
43. Giroud, J.; Bachus, R. & Bonaparte, R. "*Influence of water flow on the stability of geosynthetic - soil layered systems on slopes*". *Geosynthetics International*, 2 (6), 1149-1180. 1995.
44. Giroud, J.; Williams, N.; Pelte, T. & Beech, J. "*Stability of geosynthetic-soil layered systems on slopes*". *Geosynthetics International*, 2(6), 1115-1148. 1995.
45. Giroud, J.; Zornberg, J. & Zhao, A. "*Hydraulic design of geosynthetics and granular liquid collection layers*". *Geosynthetics International*, 7 (4-6), 285-380. 2000.
46. Hadj-Hamou, T. & Kavazanjian, J. "*Seismic stability of gentle infinite slopes*". *Journal Geotechnical Engineering*, 111(6):681–697. 1985.

47. Haug, M. & Pauls, G. "A review of non-traditional dry covers". *Saskatchewan: Mine Environment Neutral Drainage*. 2001.
48. Hojem, P. "Making Mining Sustainable: Overview of Private and Public Responses", *Lulea University of Technology*. Lulea, 2014
49. Hosney, M. & Rowe, K. "Changes in geosynthetic clay liner (GCL) properties after 2 years in a cover over arsenic-rich tailings". *Canadian Geotechnical Journal*, 50(3), 326-342. 2013.
50. International Geosynthetic Society (IGS), "Guide to the specification of geosynthetics". Florida, 2018.
51. International Network for Acid Prevention (INAP). "Global acid rock drainage guide (GARD Guide)". *Journal of Environmental and Chemical Engineering*, 2, 1785. 2014.
52. Jewell, R.; Milligan, G. & Sarsby, R. "Interaction between soil and geogrids". *Polymer Grid Reinforcement*. Londres, 1985.
53. Kavazanjian, E. "Current issues in seismic design of geosynthetic cover systems". *Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics*, 219-226. Georgia, 1998.
54. Khoshand, A.; Fathi, A.; Zoghi, M. & Kamalan, H. "Seismic stability analyses of reinforced tapered landfill cover systems considering seepage forces". *Waste Management & Research*, 36(4), 361-372. 2018.
55. Koerner, G. & Narejo, D. "Direct shear database of geosynthetic-to-geosynthetic and geosynthetic-to-soil interfaces". *GRI Report #30, Geosynthetic Research Institute*. USA, 2005.
56. Koerner, R. "Designing with geosynthetics". *Pearson Prentice Hall*. New Jersey, 2005.
57. Koerner, R. & Soong, T-Y. "Analysis and design of veneer cover soils". *Geosynthetics International*, 28-49. 2005.
58. Koerner, R. & Hwu, B. "Stability and tension considerations regarding cover soils on geomembrane liner slopes". *Geotextiles and Geomembranes*, 10, 335-355. 1991.
59. Kong, D-J.; Wu, H-N.; Chai, J-C. & Arulrajah, A. "State of the art review of geosynthetic clay liners". *Sustainability Journal*, 9, 2110. 2017.

60. Kulhawy, F. & Phoon, K-K. "Engineering judgement in the evolution from deterministic to reliability based foundation design". *Proceedings of Uncertainty '96, Uncertainty in the Geologic Environment - From Theory to Practice*, 29-48. Nueva York, 1996.
61. Lai, J.; Daniel, D. & Wright, S. "Effects of cyclic loading on internal shear strength unreinforced geosynthetic clay liner". *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(1), 45-52. 1998.
62. Lavasan, A.; Carbone, L. & Assinder, P. "A numerical and analytical study on the role of geogrid reinforcement in veneer stability". *Proceedings of the 23rd Waste Conference*, 259-267. Johannesburgo, 2016.
63. Ledesma, W. "Propuesta de tratamiento del depósito de relaves de Quiulacocha-Pasco para su remediación ambiental, basada en experiencias exitosas en empresas mineras", Tesis de Maestría. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Cerro de Pasco, 2018.
64. Lewis, B. & Gallinger, R. "Poirier site reclamation program". *Sudbury 99' Mining and the Environment Conference Proceedings*, 2, 439-448. Ontario, 1999.
65. Ling, H. & Leshchinsky, D. "Seismic stability and permanent displacement of landfill cover systems". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123:113-122. 1997.
66. Liu, C. "Tension of geosynthetic material regarding soils on landfill liner slopes". *Proceedings National Science Council*, 4, 211-218. 2001.
67. Liu, C.; Gilbert, R.; Thiel, R. & Wright, S. "Whats is an appropriate factor of safety for landfill cover slopes?". *Proceedings for Geosynthetics '97 held in Long Beach*, 481-496. Long Beach, California, 1997.
68. Liu, C. & Gilbert, R. "Simplified method for estimating geosynthetic loads in landfill liner side slopes during filling". *Geosynthetics International*, 10(1):24-33. 2003.
69. Liu, C. & Gilbert, R. "Graphical solutions for estimating geosynthetic loads in geosynthetic-soil layered systems on slopes". *Geosynthetics International*, 12(4):208-214, 2005.

70. Long, J.; Gilbert, R.; & Daly, J. "Geosynthetic loads in landfill slopes displacement compatibility". *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(11), 2009–2025. 1994.
71. Low, B. & Phoon, K. "Insights from reliability based design in geotechnical engineering". *Geo-Risk*, 459-470. 2017.
72. Matasovic, N. "Seismic response of a composite landfill cover". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (4), 448 – 455. 2006.
73. McCartney, J.; Zornberg, J. & Swan, R. "Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (2), 209-223. 2009.
74. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Minería. "Guía para la elaboración de planes de cierre de minas". Lima. 2006.
75. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Minería. "Inventario de pasivos ambientales mineros", RM N° 010-2019-MEM/DM, Lima, 2019.
76. Moraci, N.; Cardile, G.; Gioffre, D.; Mandaglio, M.; Calvarano, L. & Carbone, L. "Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis". *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1(2), 165-227. 2014.
77. Morin, K. & Hutt, N. "Environmental geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies". MDAG Publishing. Vancouver, 1997.
78. Mudd, G. "Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability". *Resource Policy*, 32, 42-56. 2007.
79. Nagaraj, D. "Minerals recovery and processing. en kirk-othmer encyclopedia of chemical technology". 16, 595-679. New Jersey, 2005.
80. Palmeira, E. "Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis". *4th European Conference on Geosynthetic-EuroGeo4*. Edimburgo, 2008.
81. Parra, D.; Valdivia, R. & Soto, C. "Análisis de envolventes no lineales de resistencia cortante de interface suelo-geomembrana y su influencia en la estabilidad de pilas de lixiviación". Segundo Congreso Panamericano de Geosintéticos. Lima, 2012.

82. Phoon, K. "Role of reliability calculations in geotechnical design". *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-18. 2016.
83. Power, C.; Ramasamy, M.; MacAskill, D.; Shea, J.; MacPhee, J.; Mayich, D. & Mkandawire, M. "Five-year performance monitoring of a HDPE cover system at a reclaimed mine waste rock pile in the Sydney Coalfield". *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (34), 26744-26762. Nueva Escocia, 2017.
84. Pozo-Antonio, J.; Puente, I.; Laguela, S. & Veiga, M. "Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión". *Tecnologías y ciencias del agua*, 75-91. 2017.
85. Pries, J. & Westhus, S. "The use of geosynthetics in mining works". *Proceedings of the 20th WasteCon Conference*, 189-194. Institute of Waste Management of Southern Africa. Somerset West, 2014.
86. Repetto, P. "The civil engineering handbook". CRC Press LLC, Hawaii University, 26,1-19. Florida, 2013.
87. Robertson, S. & Kirsten, I. "Draft acid rock drainage technical guide". *British Columbia Acid Mine Drainage Task Force*. Vancouver, 1989.
88. Rowe, K. "Performance of GCLs in liners for landfill and mining applications". *Environmental Geotechnics*, 3-21. 2014.
89. Sabatini, P.; Griffin, L.; Bonaparte, R.; Espinoza, R. & Giroud, J. "Reliability of state of practice for selection of shear strength parameters for waste containment system stability analyses". *Geotextiles and Geomembranes*, 20(4), 241-262. 2002.
90. Scheirs, J. "A guide to polymeric geomembranes". John Wiley & Sons. Australia, 2009.
91. Schneider, H. "Panel discussion: Definition and determination of characteristic soil properties". *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Balkema, 4, 2271-2274. Rotterdam, 1999.
92. Senf, D. "Creating sustainable vegetated covers over difficult slopes". *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*, 1040-1058. 2010.

93. Shukla S. & Yin J-H. "Fundamentals of Geosynthetic Engineering". *Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences*, Balkema. Londres, 2006.
94. Sia, A. "Landfill lining engineering designs. A probabilistic approach", *PhD Tesis. Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University*. Loughborough, 2007.
95. Sia, A. & Dixon, N. "Distribution and variability of interface shear strength and derived parameters". *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 139–154. 2007.
96. Sia, A. & Dixon, N. "Deterministic and reliability-based design: veneer cover soil stability". *Geosynthetics International*, 15(1), 1-13. 2008.
97. Stoewahse, C.; Dixon, N.; Jones, N.; Blumel, W. & Kamugisha, P. "Geosynthetic interface shear behaviour". *Ground Engineering*, 35-41. 2002.
98. Strenk, P. "Evaluation of analytical procedures for estimating seismically induced permanent deformation". *PhD Tesis, Drexel University*. Pensilvania, 2010.
99. Swan R.; Bonaparte J. & Bachus R. "Effect of soil compaction conditions on geomembrane-soil interface strength". *Geotextiles and Geomembranes*, 10, 523-529, Georgia, 1991.
100. Taylor, G.; Spain, A.; Timms, G.; Kuznetsov, V. & Bennett, J. "Determination of the reasons for deterioration of the rum jungle waste rock cover". *Report of Australian Center For Mining Environmental Research*. Queensland, 2003.
101. Texeira, S.; Bueno, B. & Zornberg, J. "Pullout resistance of individual longitudinal and transverse geogrid ribs". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133:37-50. 2007.
102. Thiel, R. "Peak vs. residual shear strength for landfill bottom liner stability analyses". *Proceedings of the 15th Annual GRI Conference Hot Topics in Geosynthetics – II*, 40-70. Houston, 2001.
103. Thiel, R. "Slope stability sensitivities of final covers". *The First Pan American Geosynthetic Conference and Exhibition*. Cancún, 2008.

104. Thielmann, S.; Fox, P. & Athanassopoulos, C. “*Interface shear testing of GCL liner systems for very high normal stress conditions*”. *Geo-Congress*. 2013.
105. Touze-Foltz, N.; Lupo, J. & Barroso, M. “*Geoenvironmental applications of geosynthetics*”. *EuroGeo 2008 Conference*. Edimburgo, 2008.
106. USACE. “*Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*”, *Engineering Technical Letter* N° 1110-2-547. USA, 1995.
107. Wilson, G.; Williams, D. & Rykaart, E. “*The integrity of cover systems - An update*”. *Proceedings of the 6th International Conference for Acid Rock Drainage*, 445-451. Queensland, 2003.
108. Wilson, W.; Brussière, B. & Guerrero, J. “*Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros*”. Ministerio de Energía y Minas del Perú. Lima, 2007.
109. Worrall, R.; Neil, D.; Brereton, D. & Mulligan, D. “*Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land*”. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1426–1434. 2009.
110. Yegian, M. & Lahlaf, A. “*Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles*”. *Journal Geotechnical Engineering*, 118, 760-779. 1992.
111. Zanzinger, H. & Saathoff, F. “*Long-term internal shear strength of a reinforced GCL based on shear creep rupture tests*”. *Geotextiles and Geomembranes*, 33, 43–50. 2012
112. Zhang B.; Fowmes G. & Russell D. “*Landfill capping stability: tapered solution with seepage*”. *Waste and Resource Management*, 165, 141-149. 2012

ANEXOS

ANEXO A: GRÁFICAS DE TENDENCIA DE FS PARA DIFERENTES CONDICIONES DE SERVICIO

ANEXO A.1: SISTEMAS DE COBERTURA EN TALUDES DE H=10 m

ANEXO A.2: SISTEMAS DE COBERTURA EN TALUDES DE H=30 m

ANEXO B: ENSAYOS ESTÁNDARES Y ESPECIALES DE MECÁNICA DE SUELOS

ANEXO B.1: ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN SUCS

ANEXO B.2: ENSAYOS PROCTOR ESTÁNDAR

ANEXO B.3: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE PARED RÍGIDA

ANEXO B.4: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE PARED FLEXIBLE

ANEXO C: ENSAYOS DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA EN INTERFASES CON GEOSINTÉTICOS

ANEXO C.1: INTERFASE GM-SG

ANEXO C.2: INTERFASE GM-SBP

ANEXO C.3: INTERFASE GCL-SG

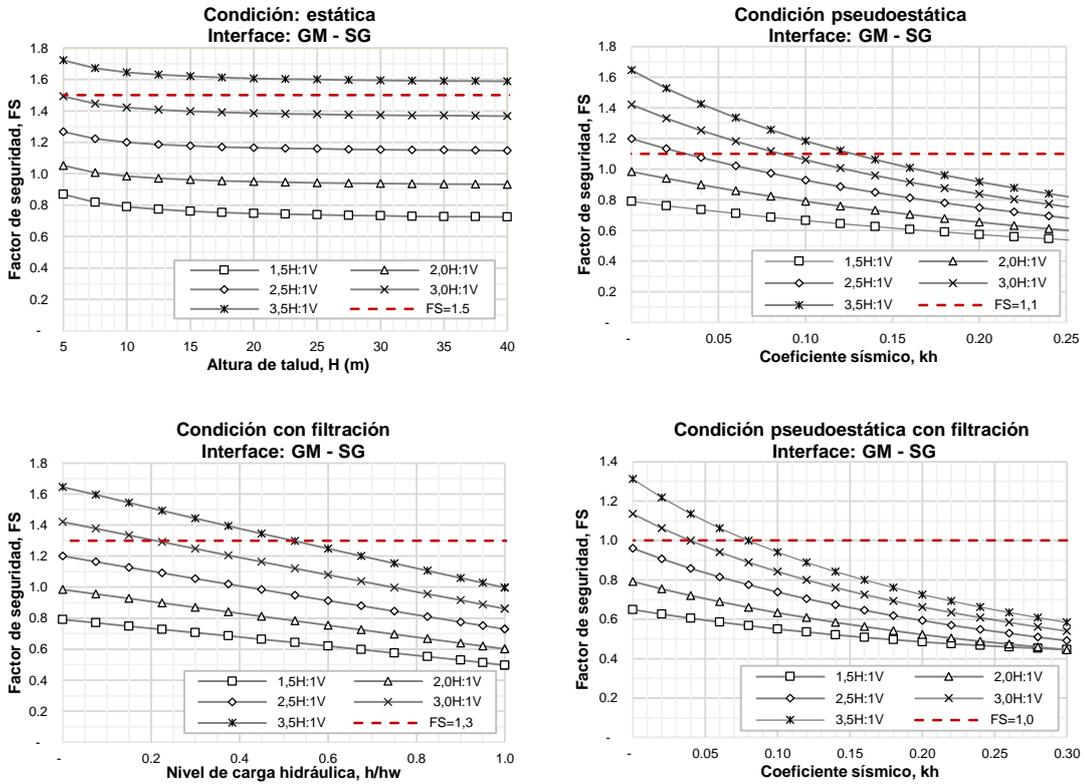
ANEXO C.4: INTERFASE GM-GCL

**ANEXO A: GRÁFICAS DE TENDENCIA DE FS EN SISTEMAS DE
COBERTURA PARA DIFERENTES CONDICIONES DE SERVICIO**

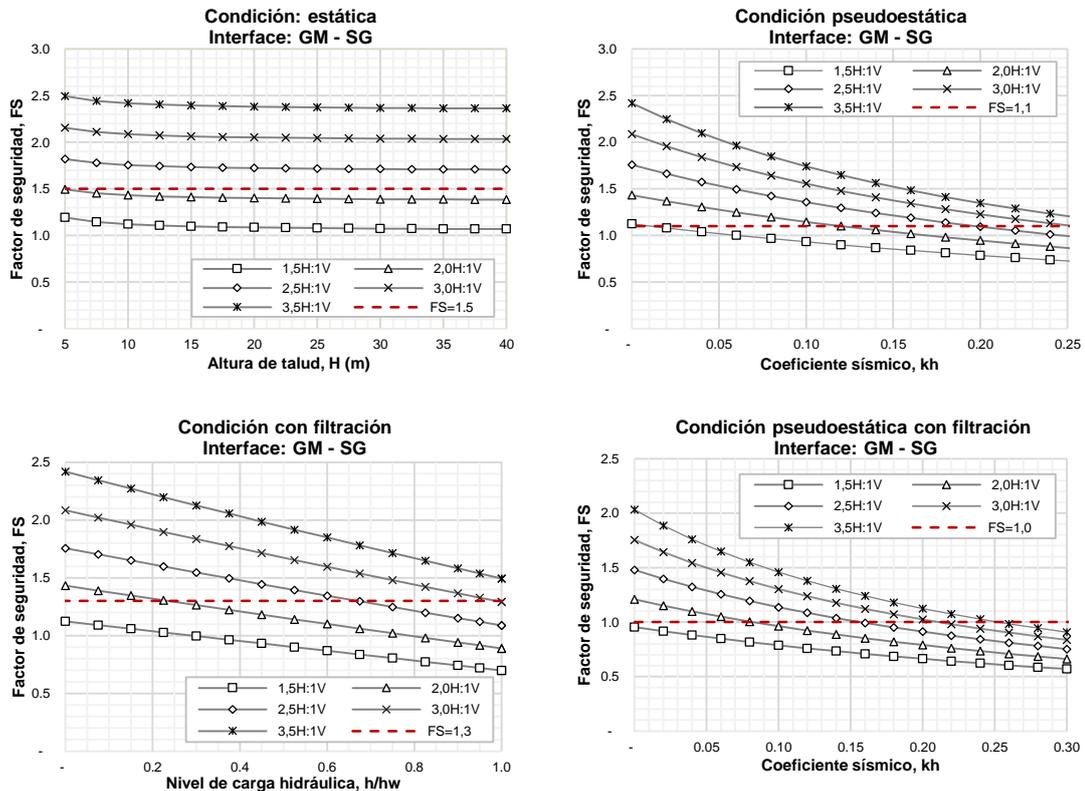
ANEXO A.1: SISTEMAS DE COBERTURA EN TALUDES DE H=10 m

SISTEMA DE COBERTURA TIPO I INTERFASE CRÍTICA: GM-SG

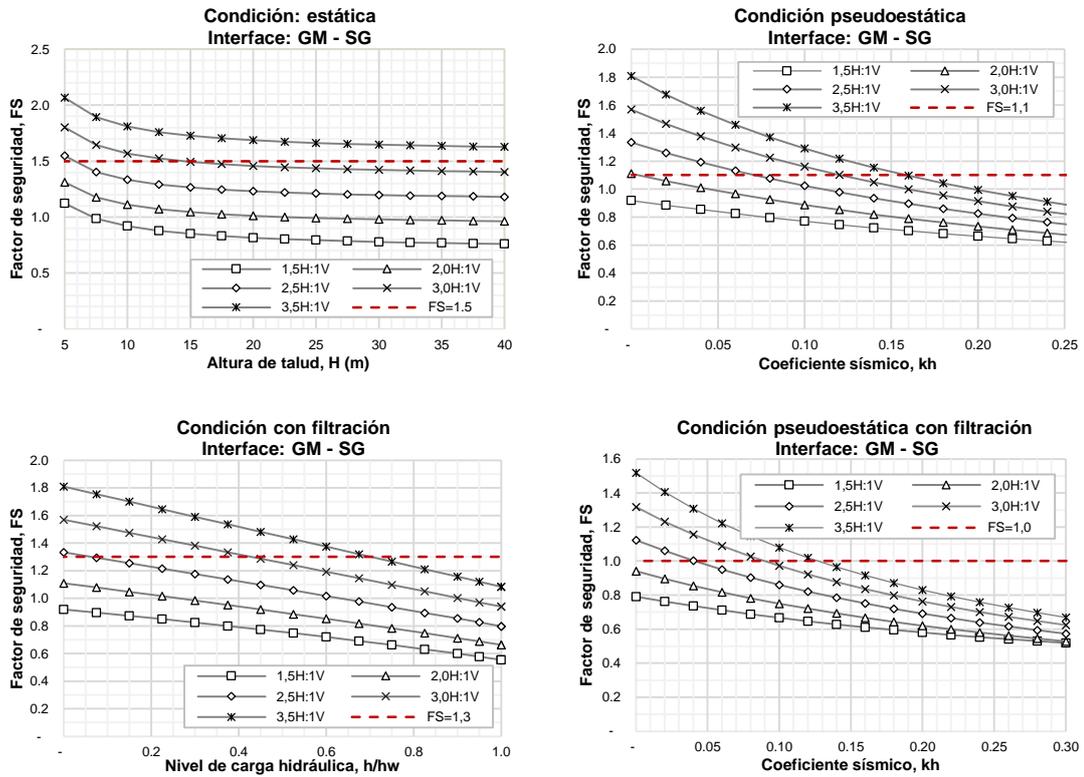
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE PROMEDIO



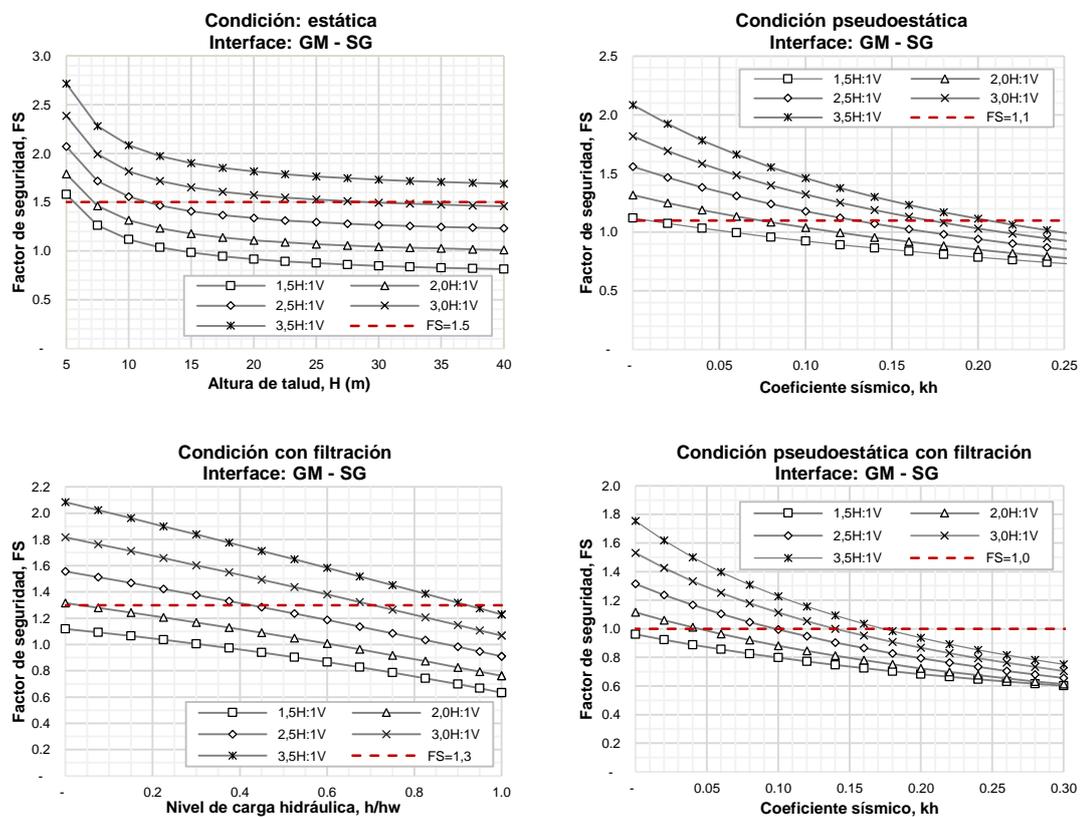
b) CASO II: RESISTENCIA AL CORTE MAYOR



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS

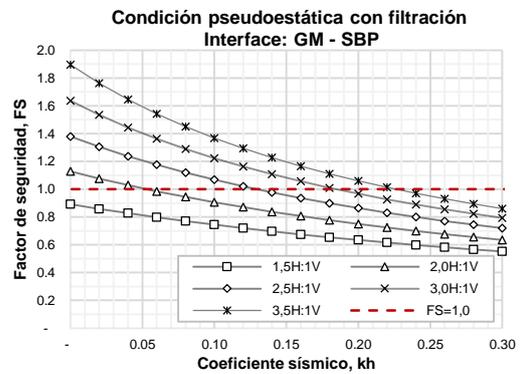
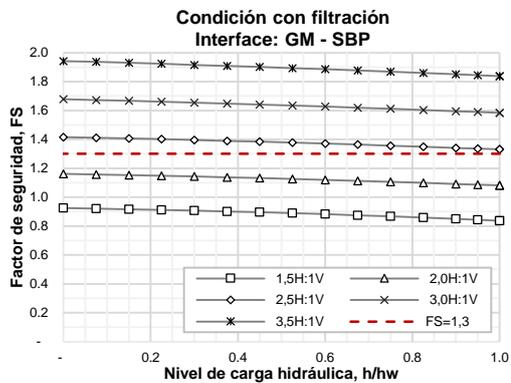
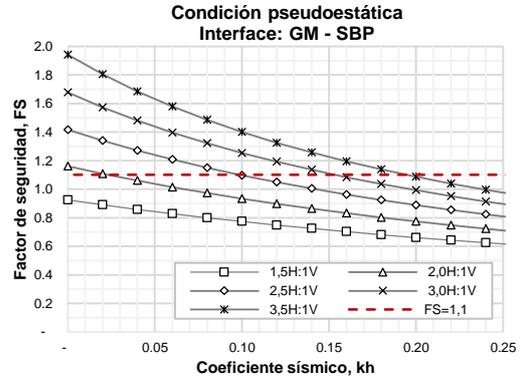
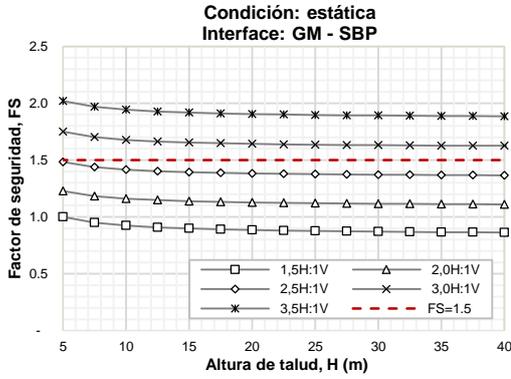


d) CASO IV: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA

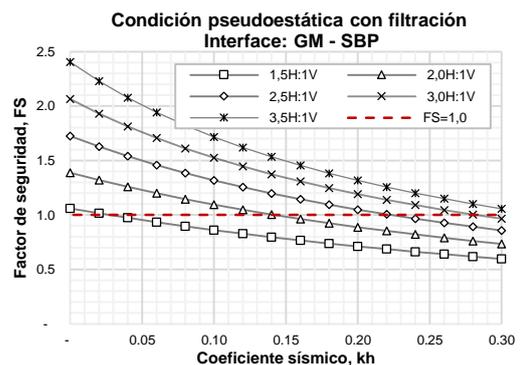
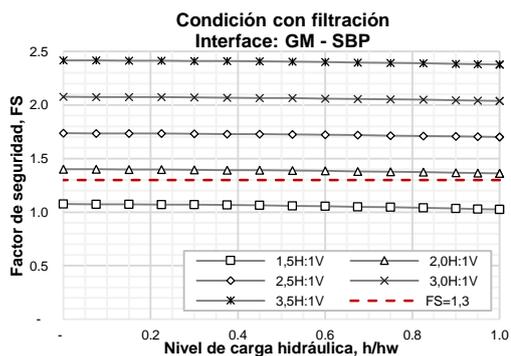
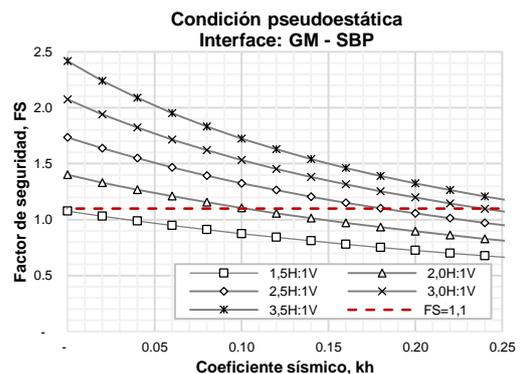
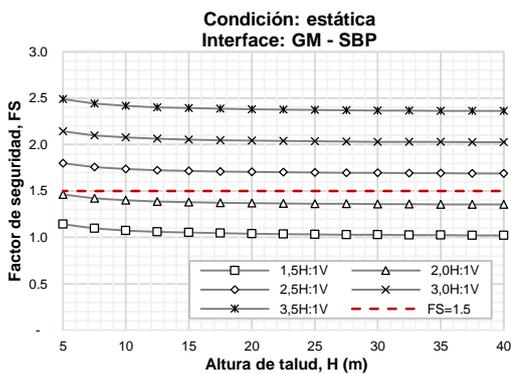


SISTEMA DE COBERTURA TIPO I INTERFASE CRÍTICA: GM-SBP

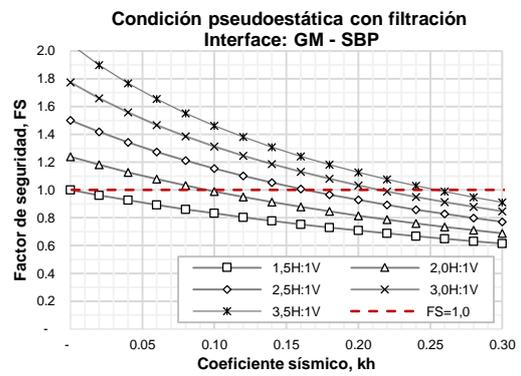
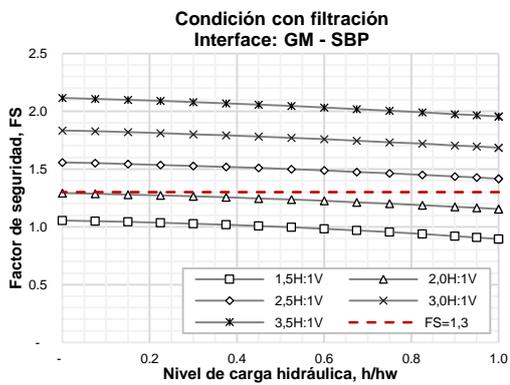
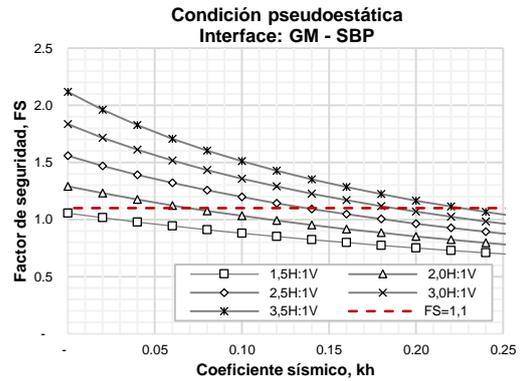
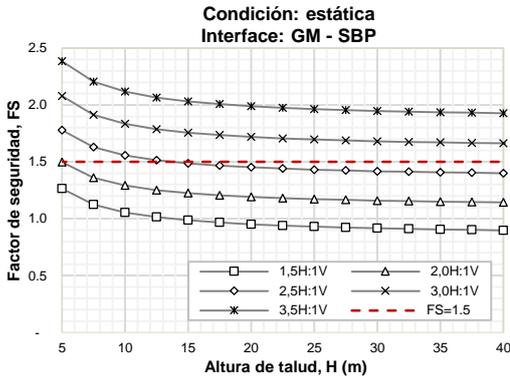
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE PROMEDIO



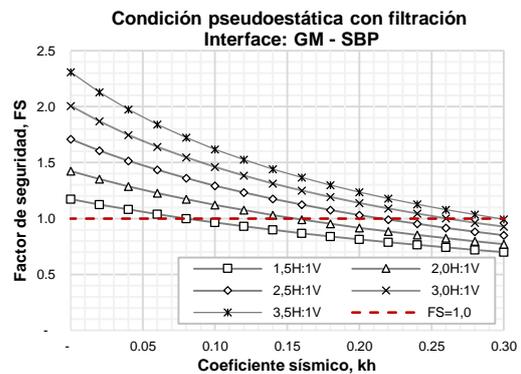
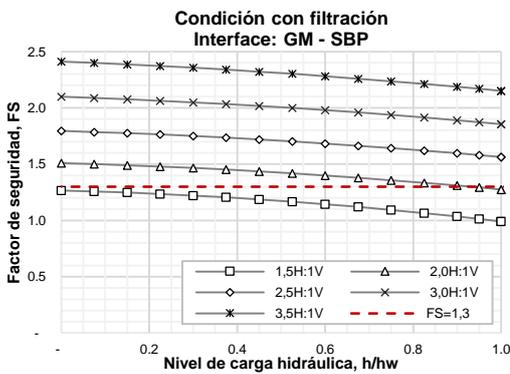
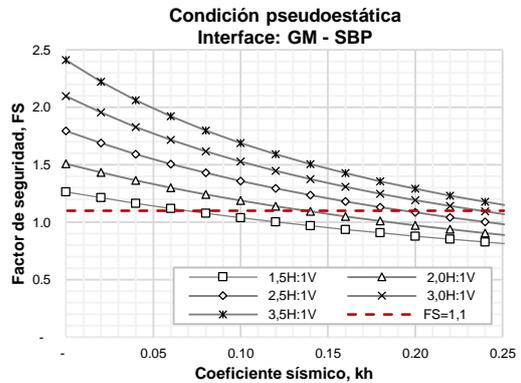
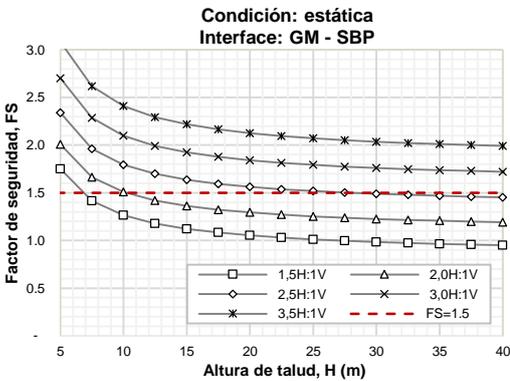
b) CASO II: RESISTENCIA AL CORTE MAYOR



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS

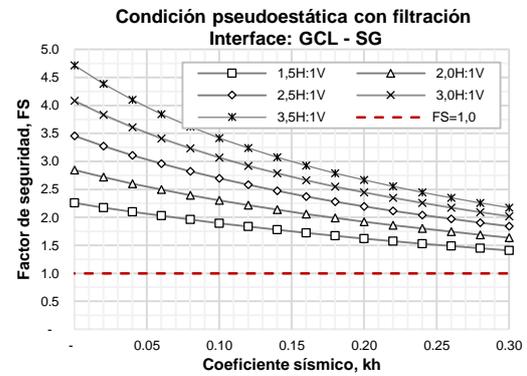
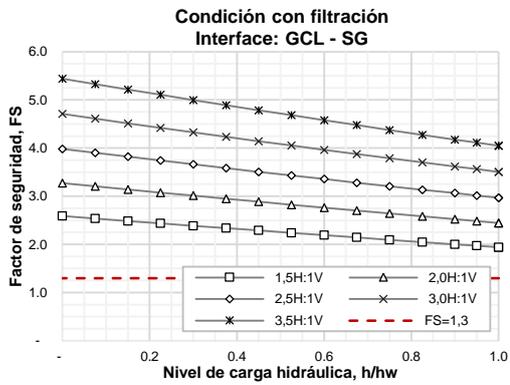
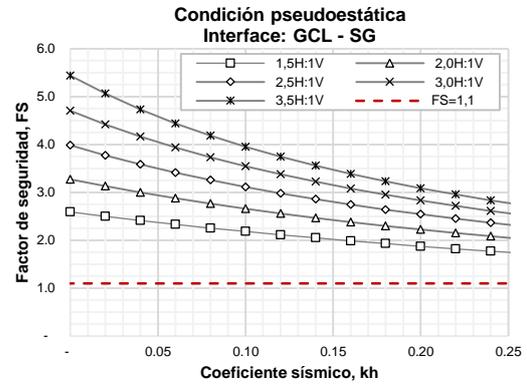
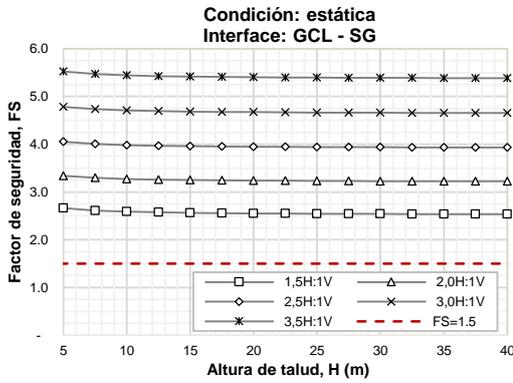


d) CASO IV: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA

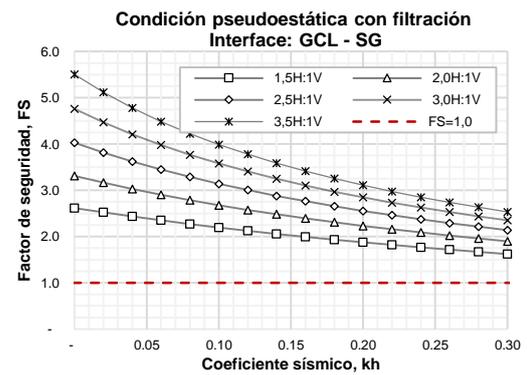
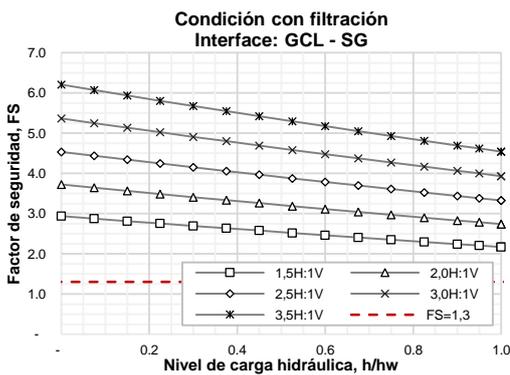
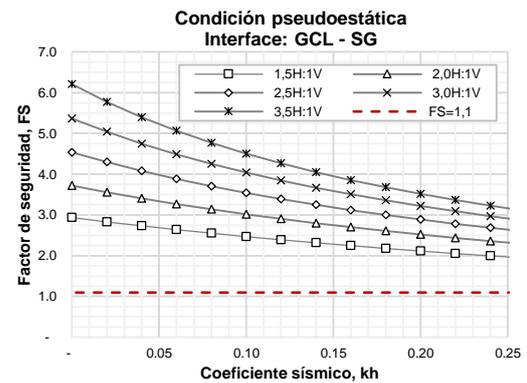
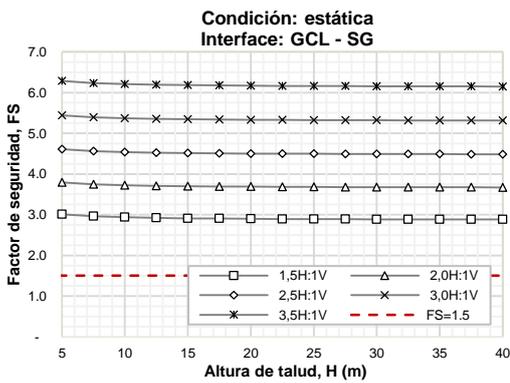


SISTEMA DE COBERTURA TIPO II INTERFASE CRÍTICA: GCL-SG

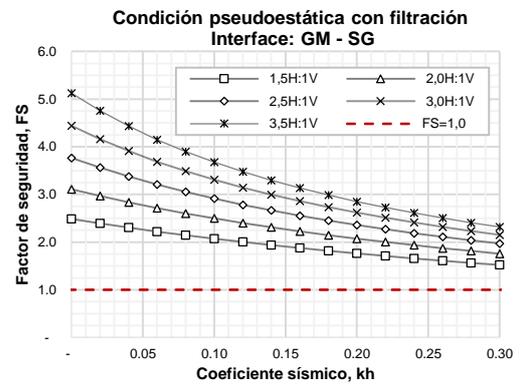
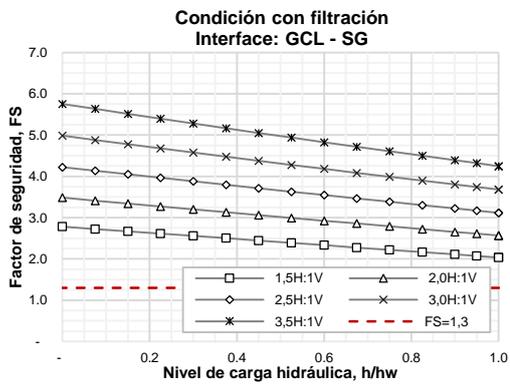
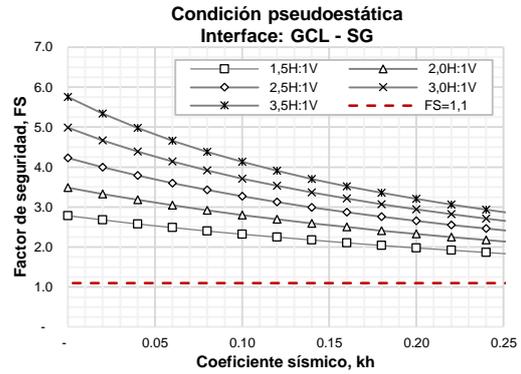
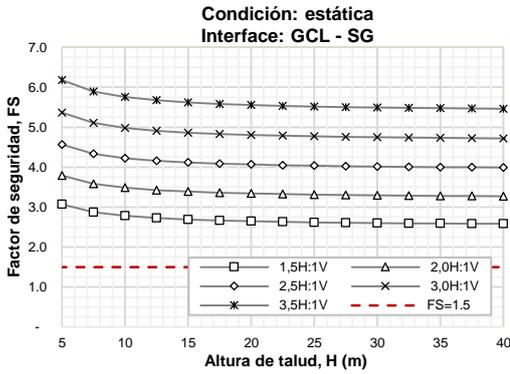
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE PROMEDIO



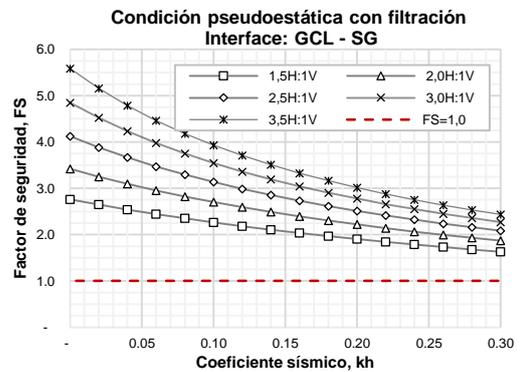
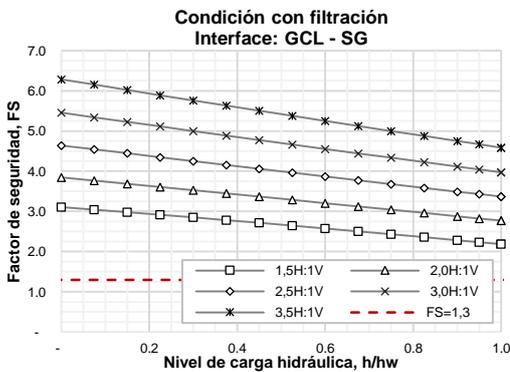
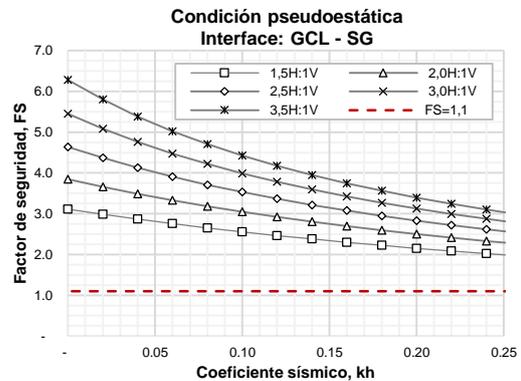
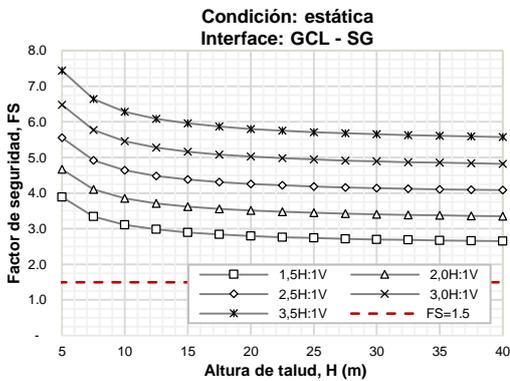
b) CASO II: RESISTENCIA AL CORTE MAYOR



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS

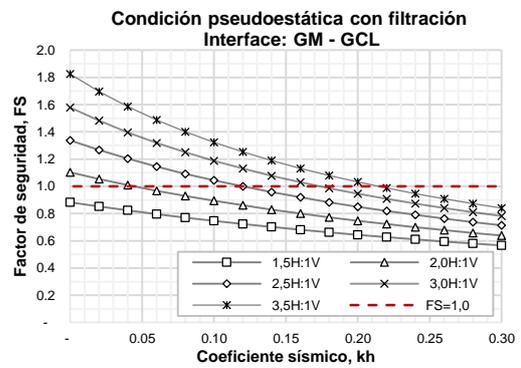
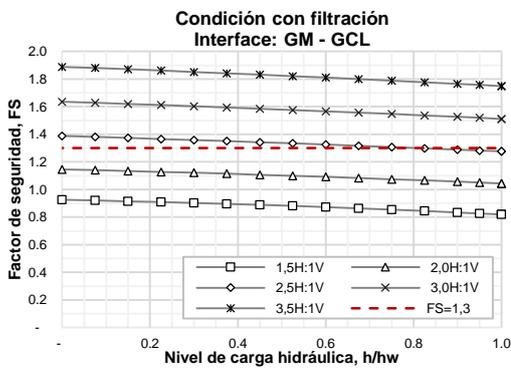
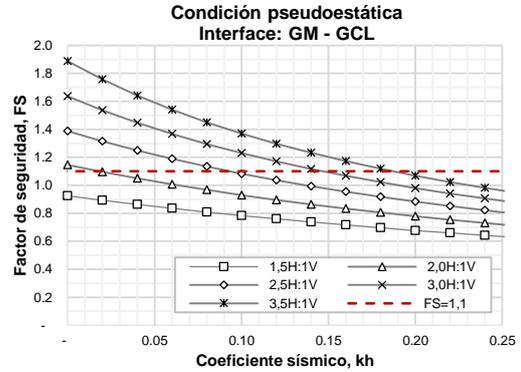
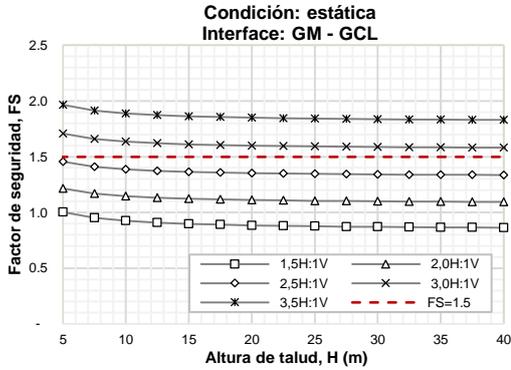


d) CASO IV: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA

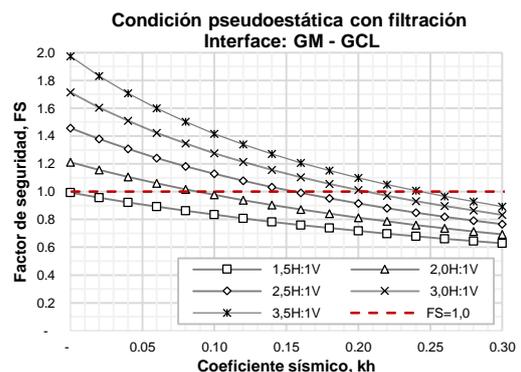
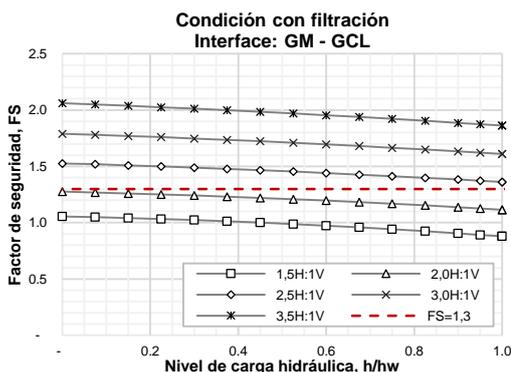
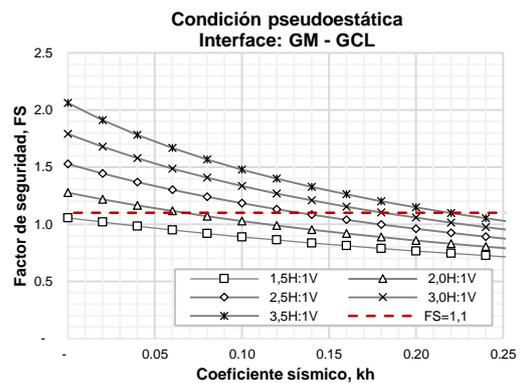
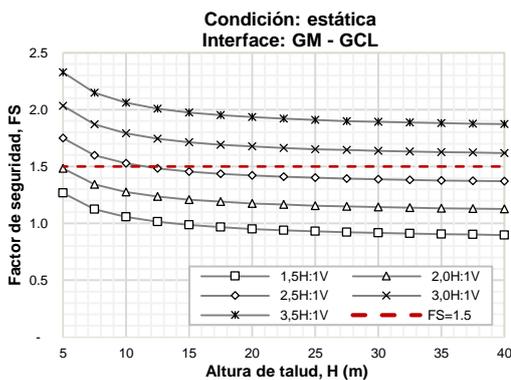


SISTEMA DE COBERTURA TIPO III INTERFASE CRÍTICA: GM-GCL (lado no tejido)

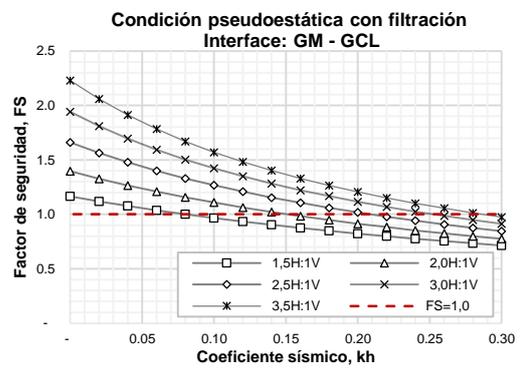
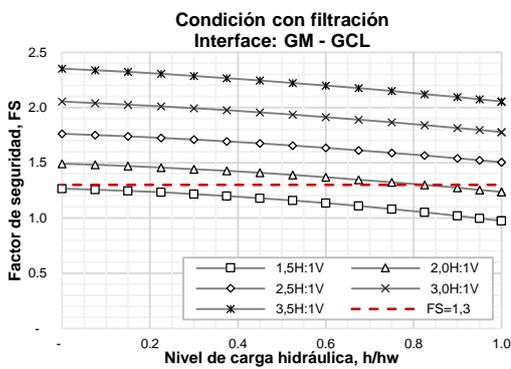
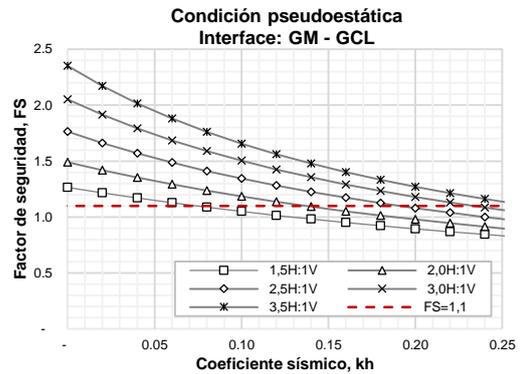
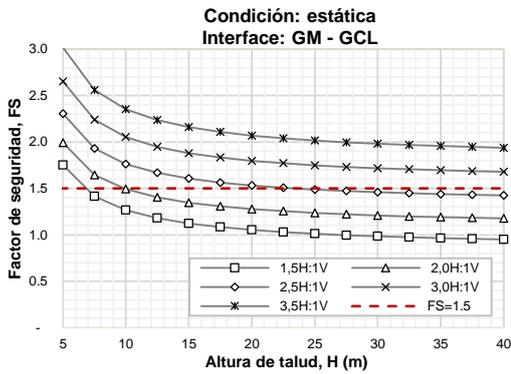
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE



b) CASO II: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS



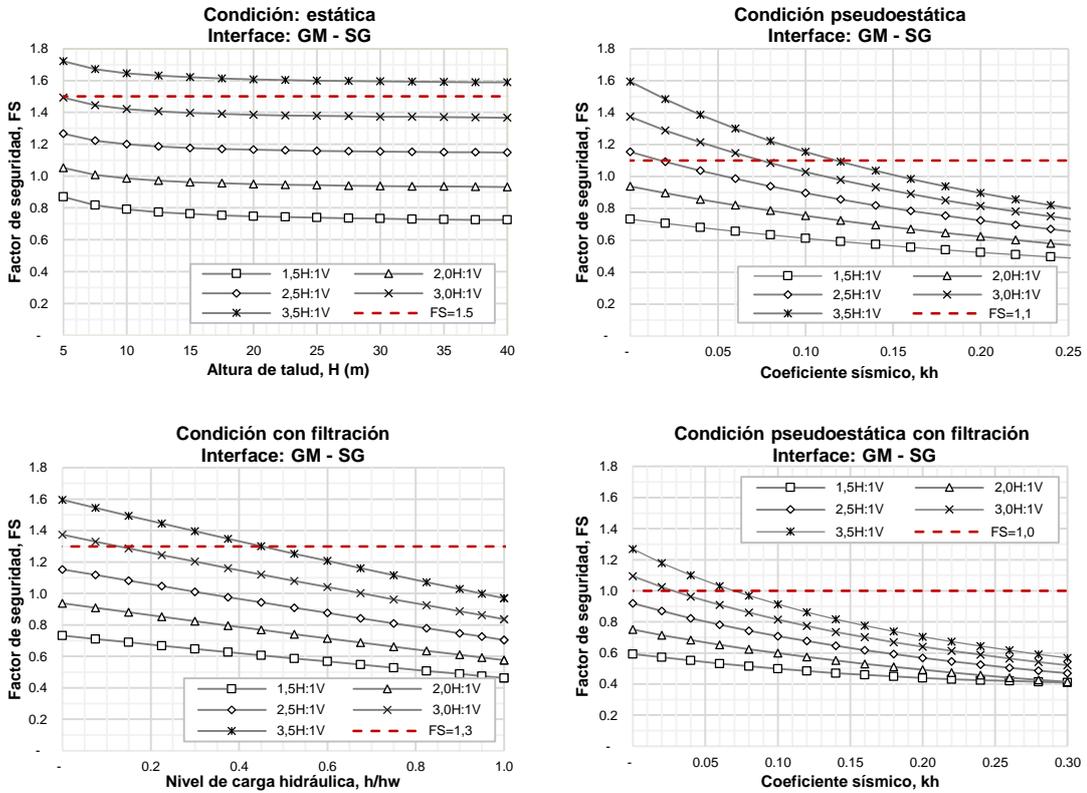
c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA



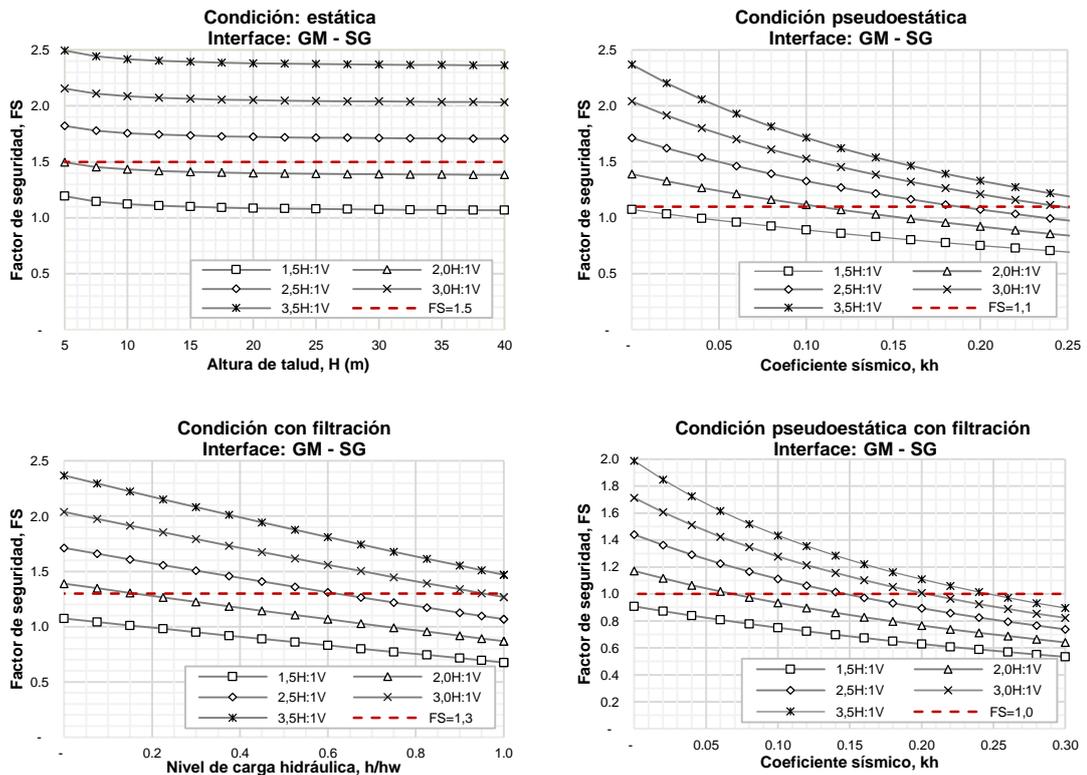
ANEXO A.2: SISTEMAS DE COBERTURA EN TALUDES DE H=30 m

SISTEMA DE COBERTURA TIPO I INTERFASE CRÍTICA: GM-SG

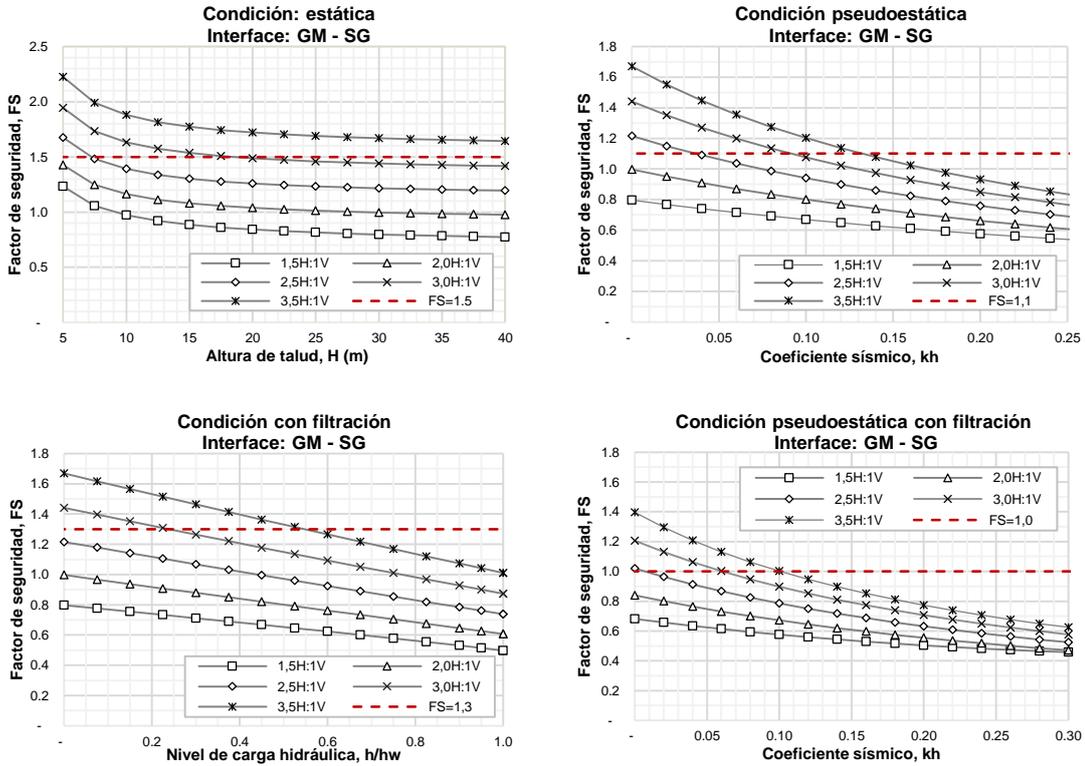
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE PROMEDIO



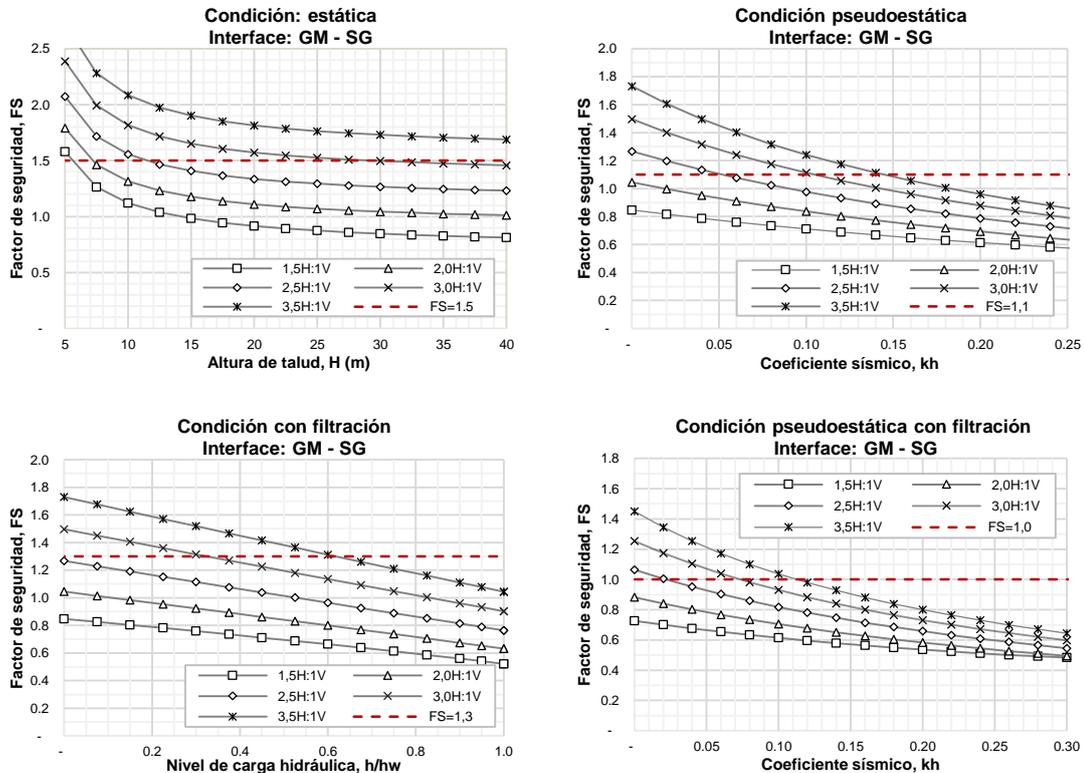
b) CASO II: RESISTENCIA AL CORTE MAYOR



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS

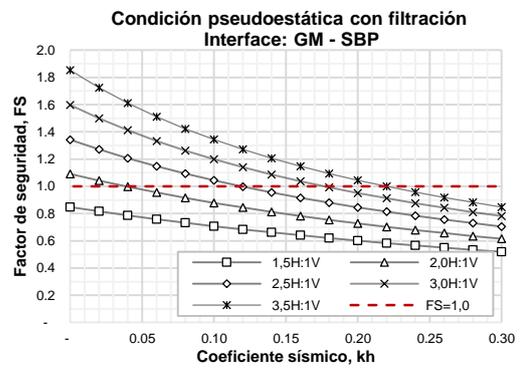
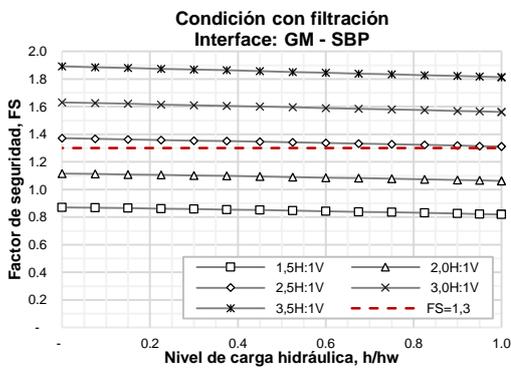
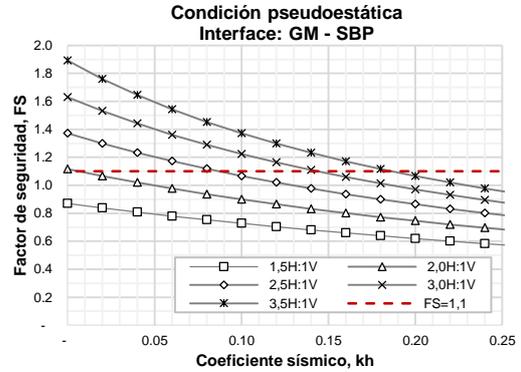
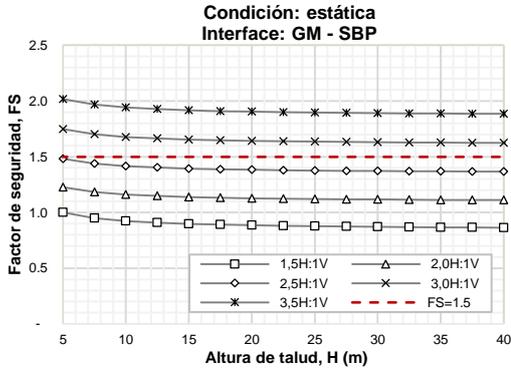


d) CASO IV: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA

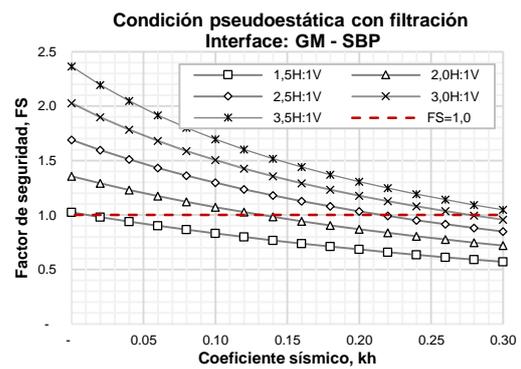
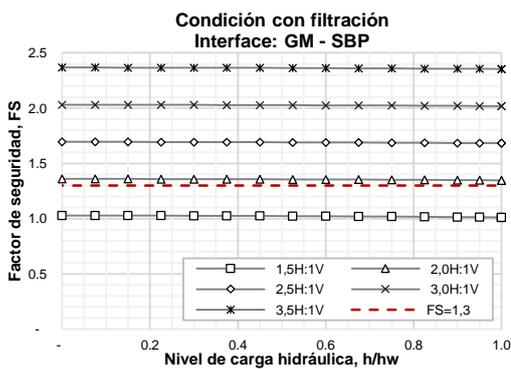
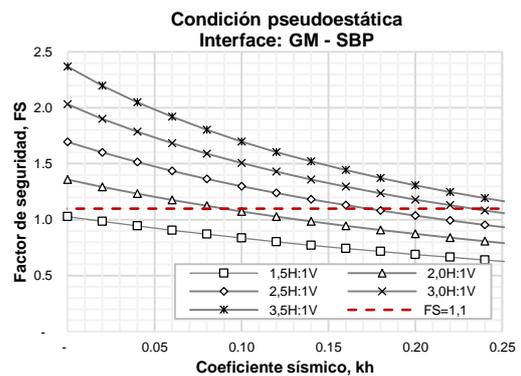
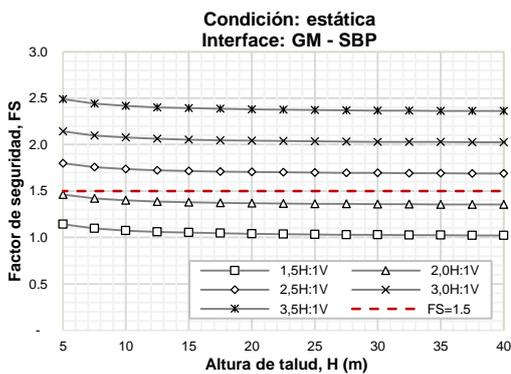


SISTEMA DE COBERTURA TIPO I INTERFASE CRÍTICA: GM-SBP

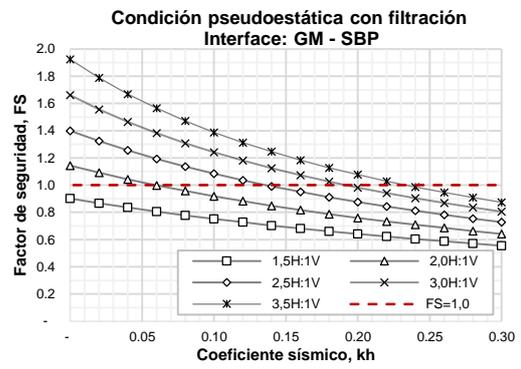
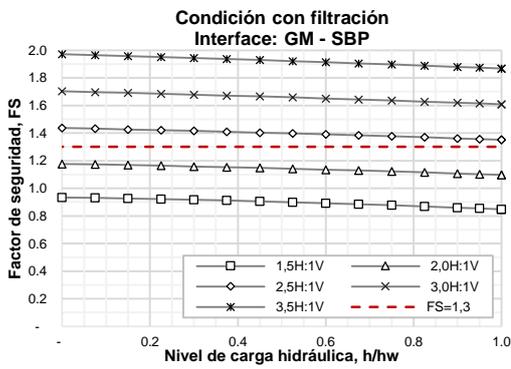
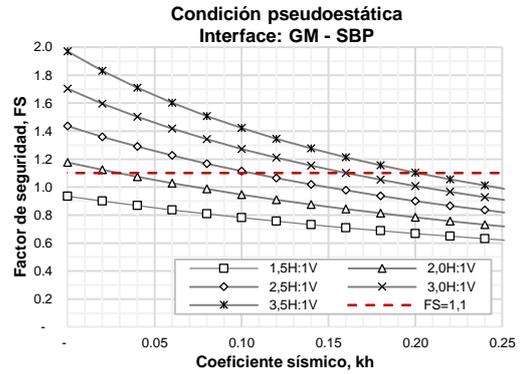
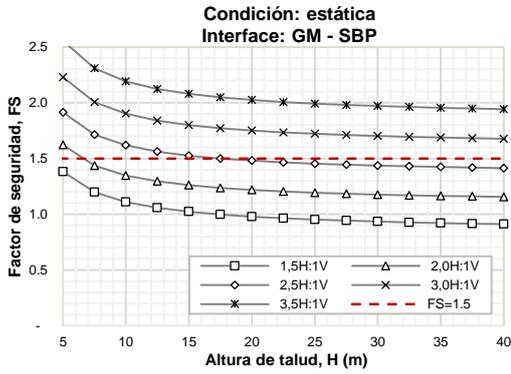
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE PROMEDIO



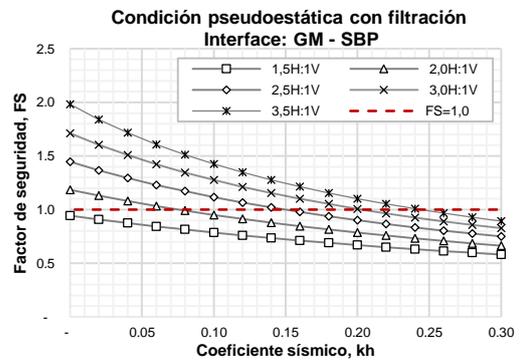
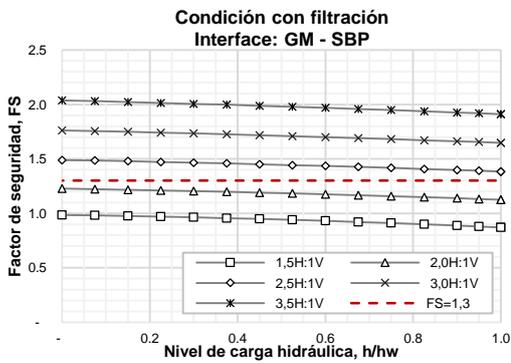
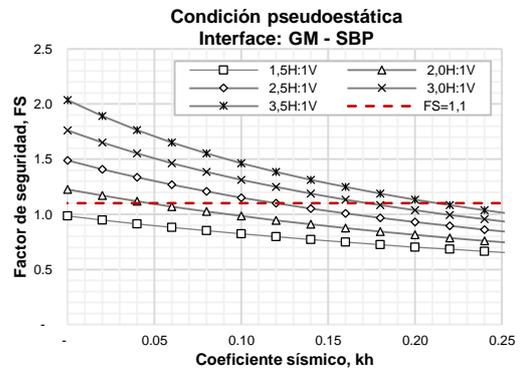
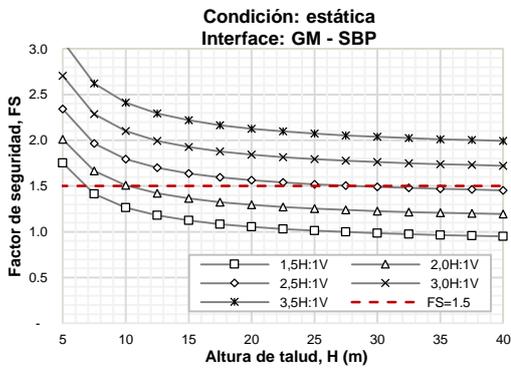
b) CASO II: RESISTENCIA AL CORTE MAYOR



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS

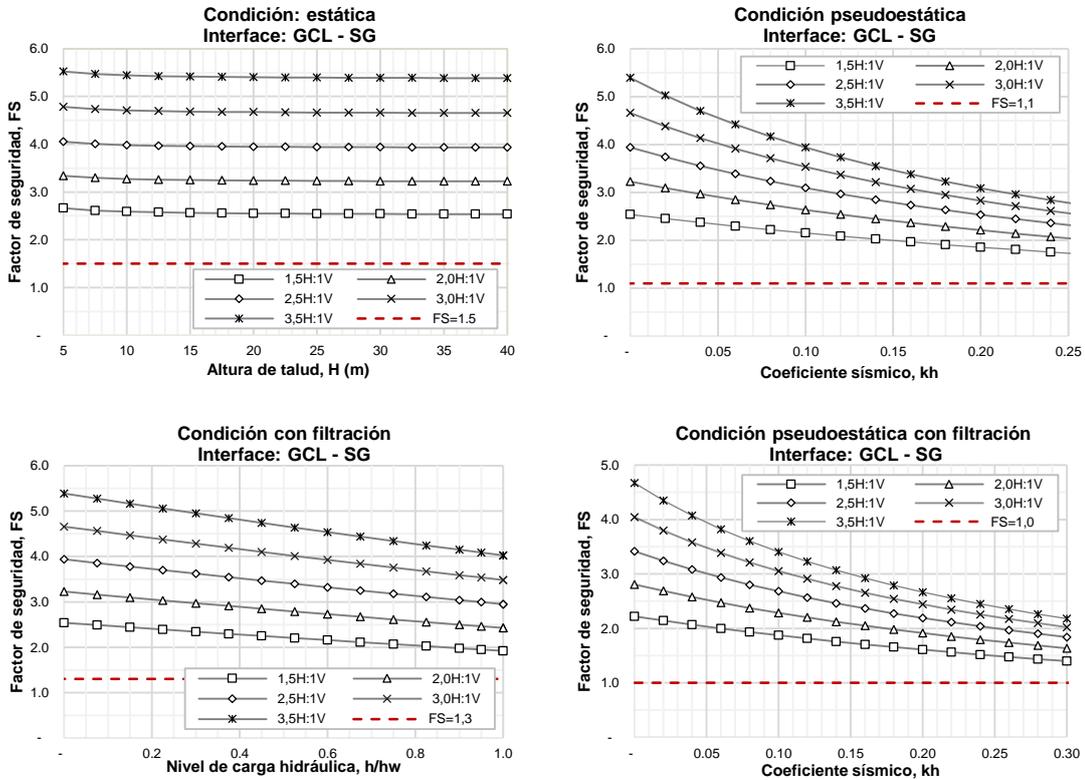


d) CASO IV: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA

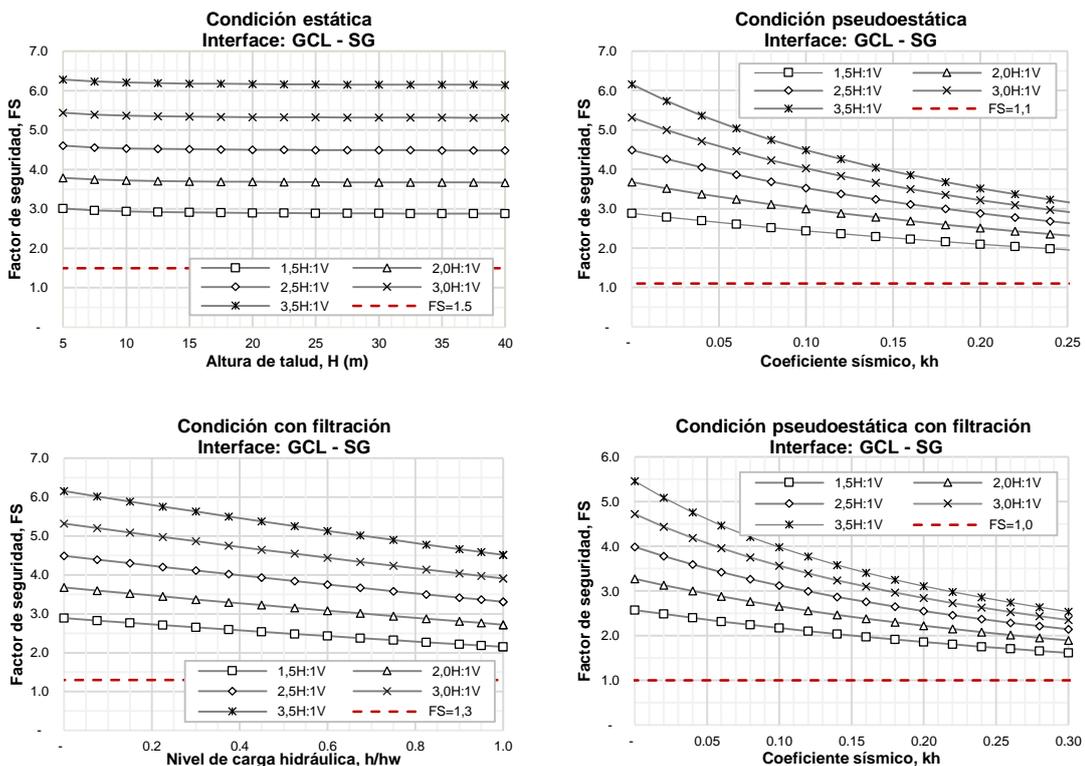


SISTEMA DE COBERTURA TIPO II INTERFASE CRÍTICA: GCL-SG

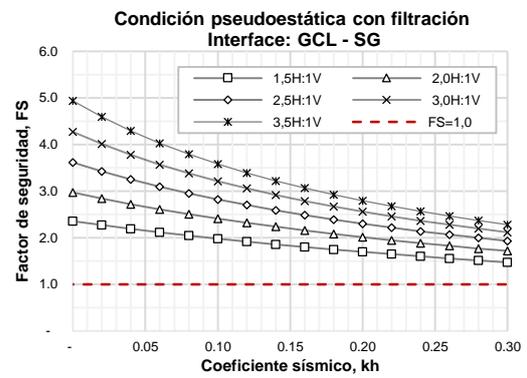
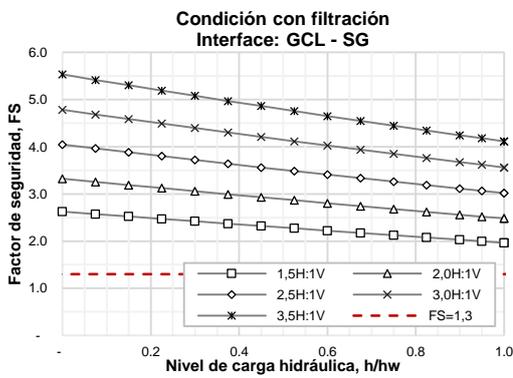
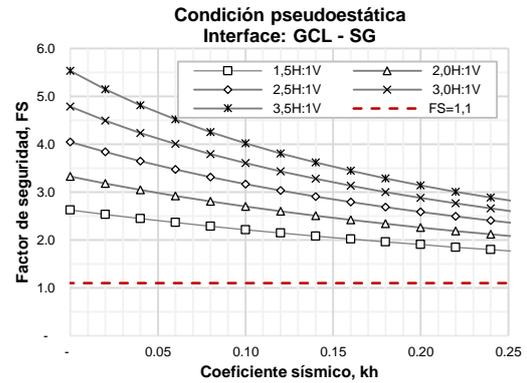
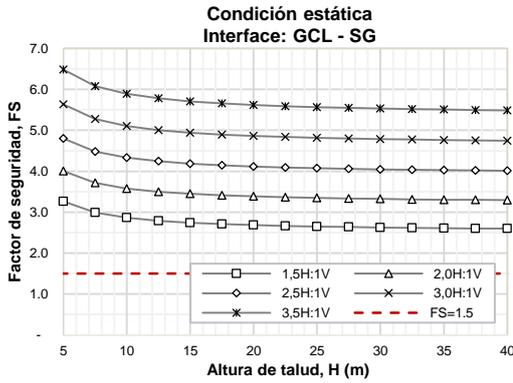
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE PROMEDIO



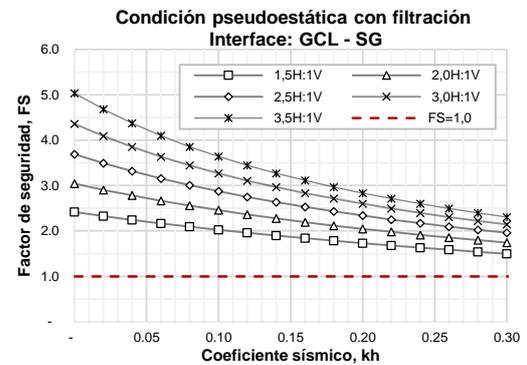
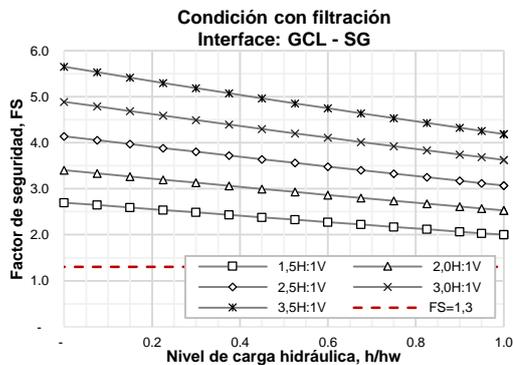
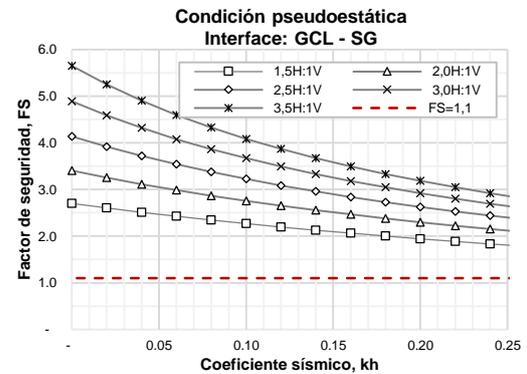
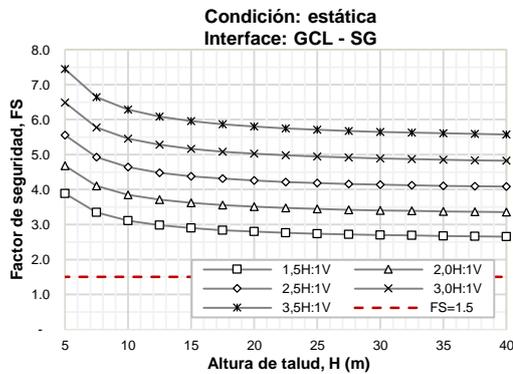
b) CASO II: RESISTENCIA AL CORTE MAYOR



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS

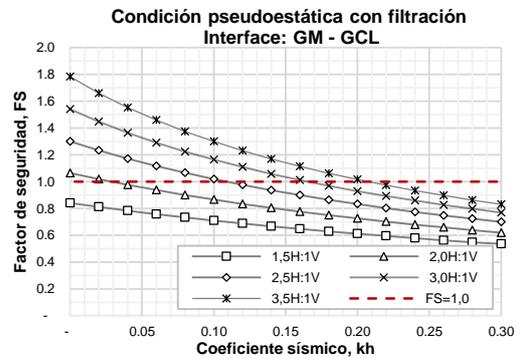
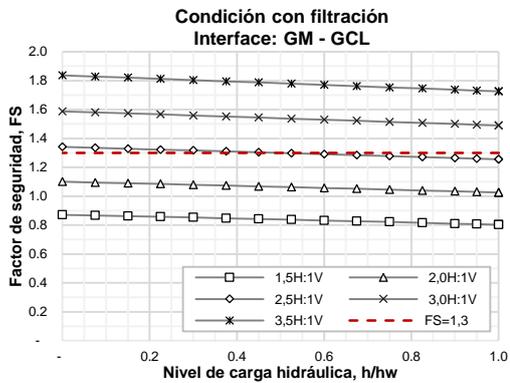
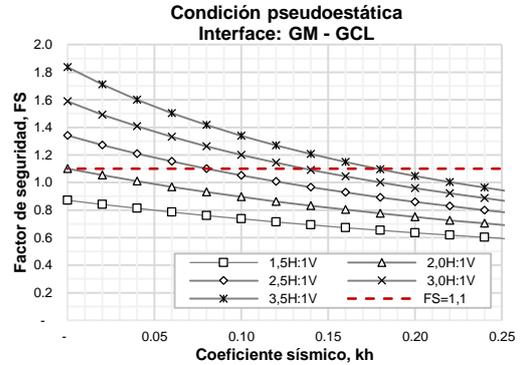
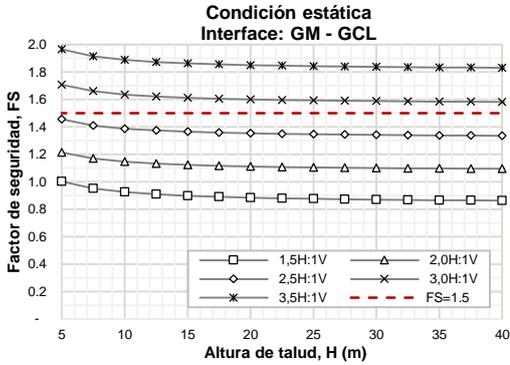


d) CASO IV: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA

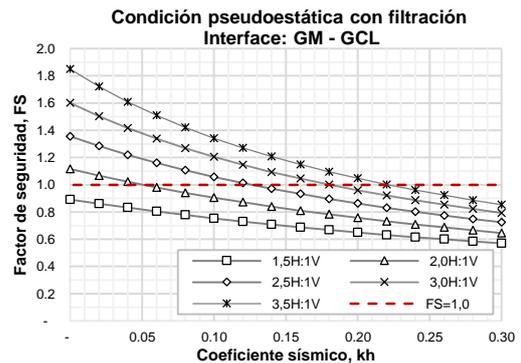
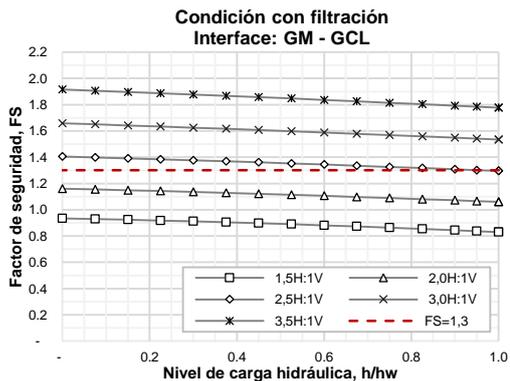
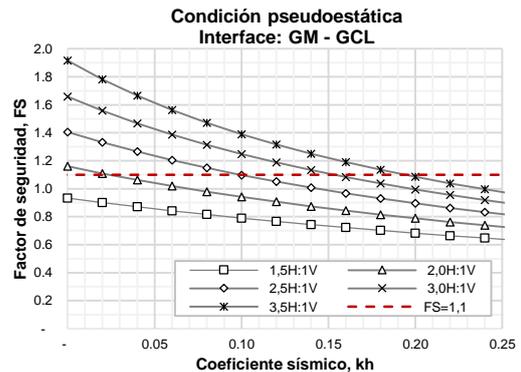
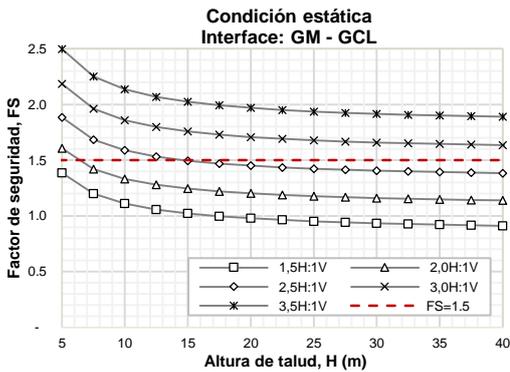


**SISTEMA DE COBERTURA TIPO III
 INTERFASE CRÍTICA: GM-GCL (lado no tejido)**

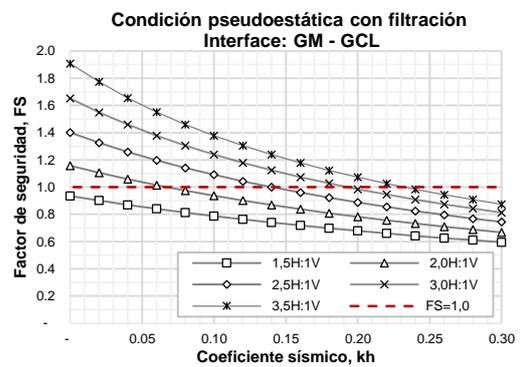
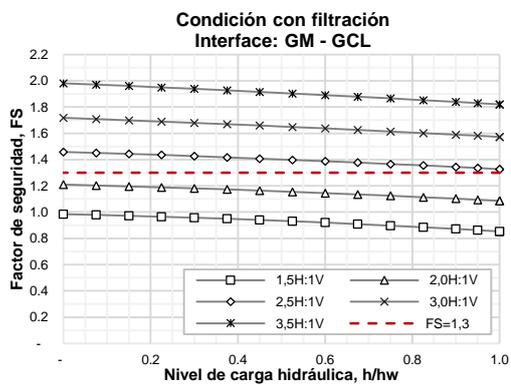
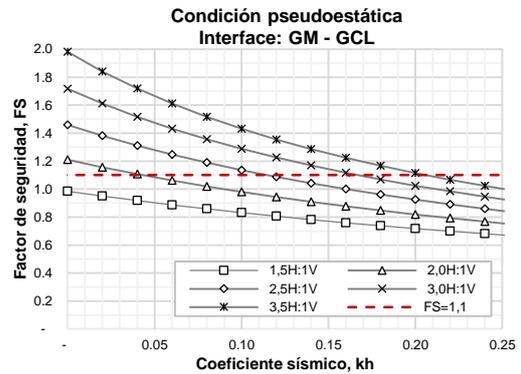
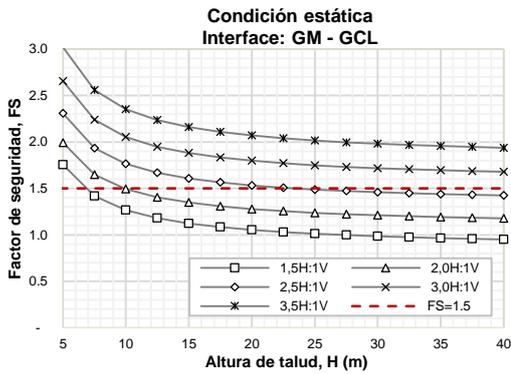
a) CASO I: RESISTENCIA AL CORTE



b) CASO II: REFORZAMIENTO CON GEOMALLAS



c) CASO III: REFORZAMIENTO CON GEOMALLA Y GEOCELDA



ANEXO B: ENSAYOS ESTÁNDARES Y ESPECIALES DE MECÁNICA DE SUELOS

ANEXO B.1: ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN SUCS

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-01	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	100,0
1/2"	12,700	100,0
3/8"	9,525	100,0
Nº4	4,760	100,0
Nº10	2,000	94,9
Nº20	0,850	87,4
Nº40	0,425	79,8
Nº100	0,150	66,6
Nº200	0,075	58,3

Partículas >3" (%)	--
Grava (%)	0,0
Arena (%)	41,7
Limos y Arcillas (%)	58,3

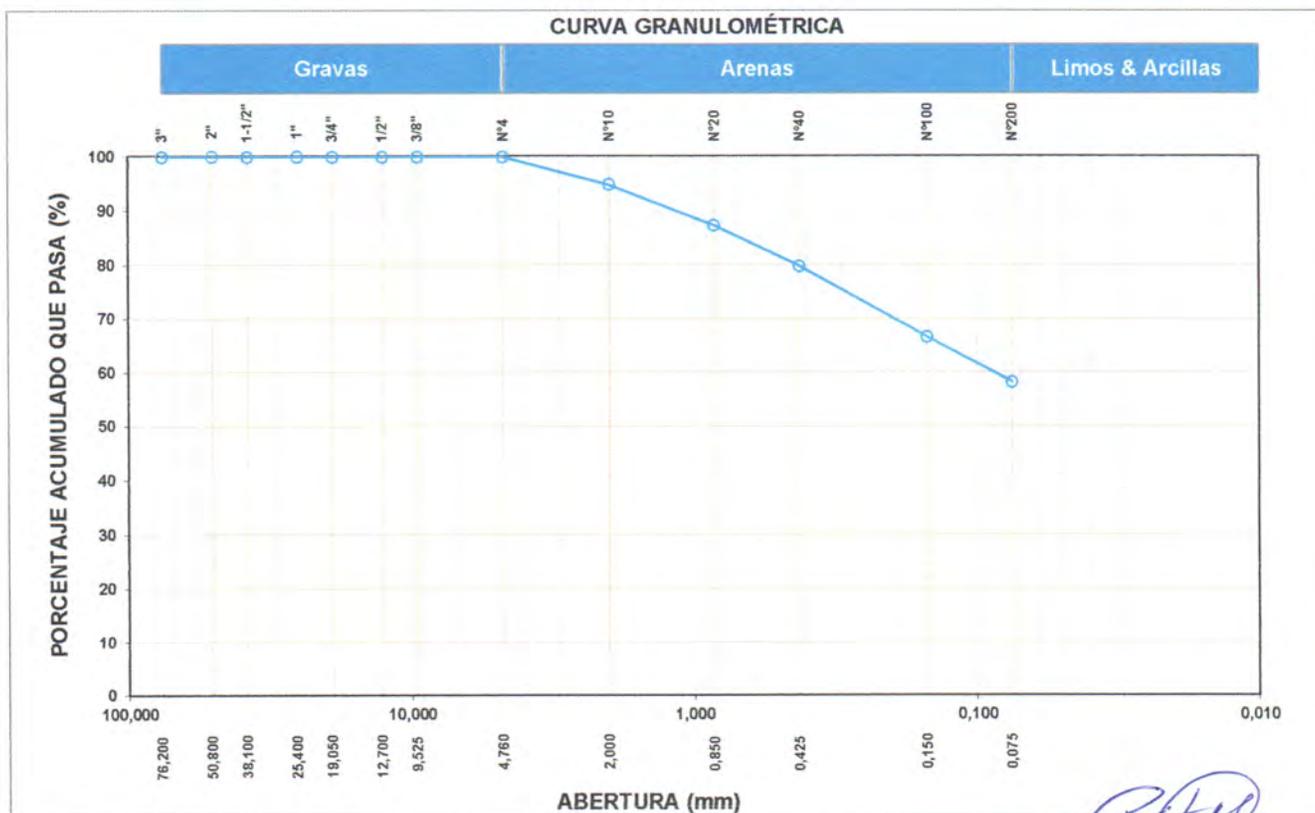
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	0,09
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	59
LP (%)	27
IP (%)	32

Humedad (%)	11,8
-------------	------

SUCS	CH
------	----

Arcilla de alta plasticidad arenosa



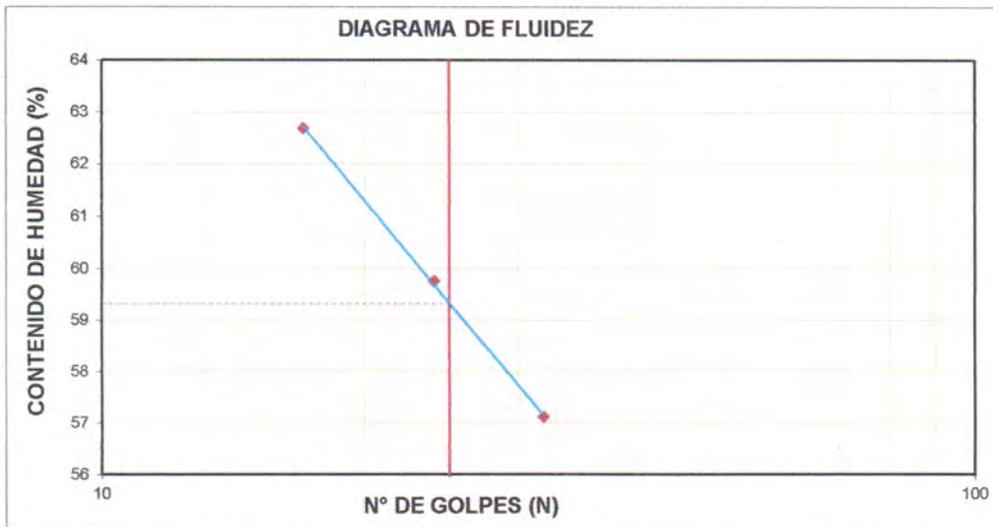
Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

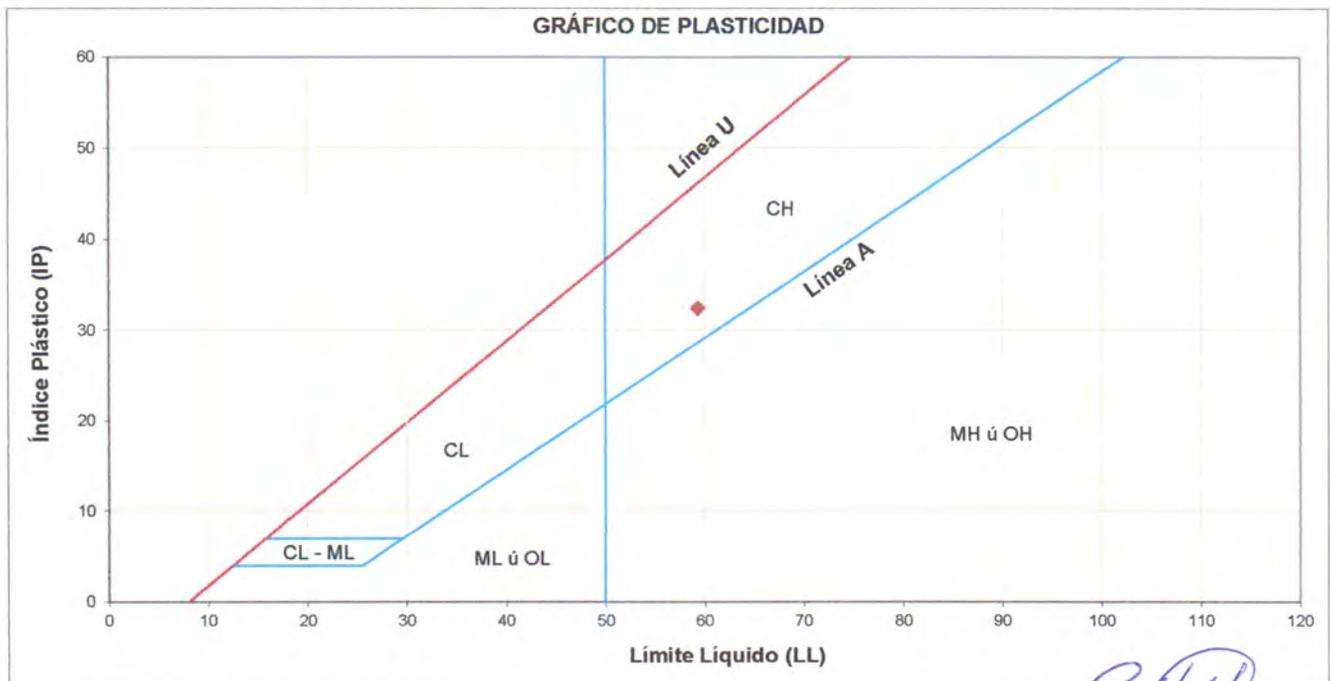
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-01	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		



Límites de Atterberg	
LL (%)	59
LP (%)	27
IP (%)	32



Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MR	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-02	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	100,0
1/2"	12,700	99,9
3/8"	9,525	99,9
Nº4	4,760	99,9
Nº10	2,000	90,2
Nº20	0,850	78,4
Nº40	0,425	70,8
Nº100	0,150	61,8
Nº200	0,075	54,6

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	0,1
Arena (%)	45,3
Limos y Arcillas (%)	54,6

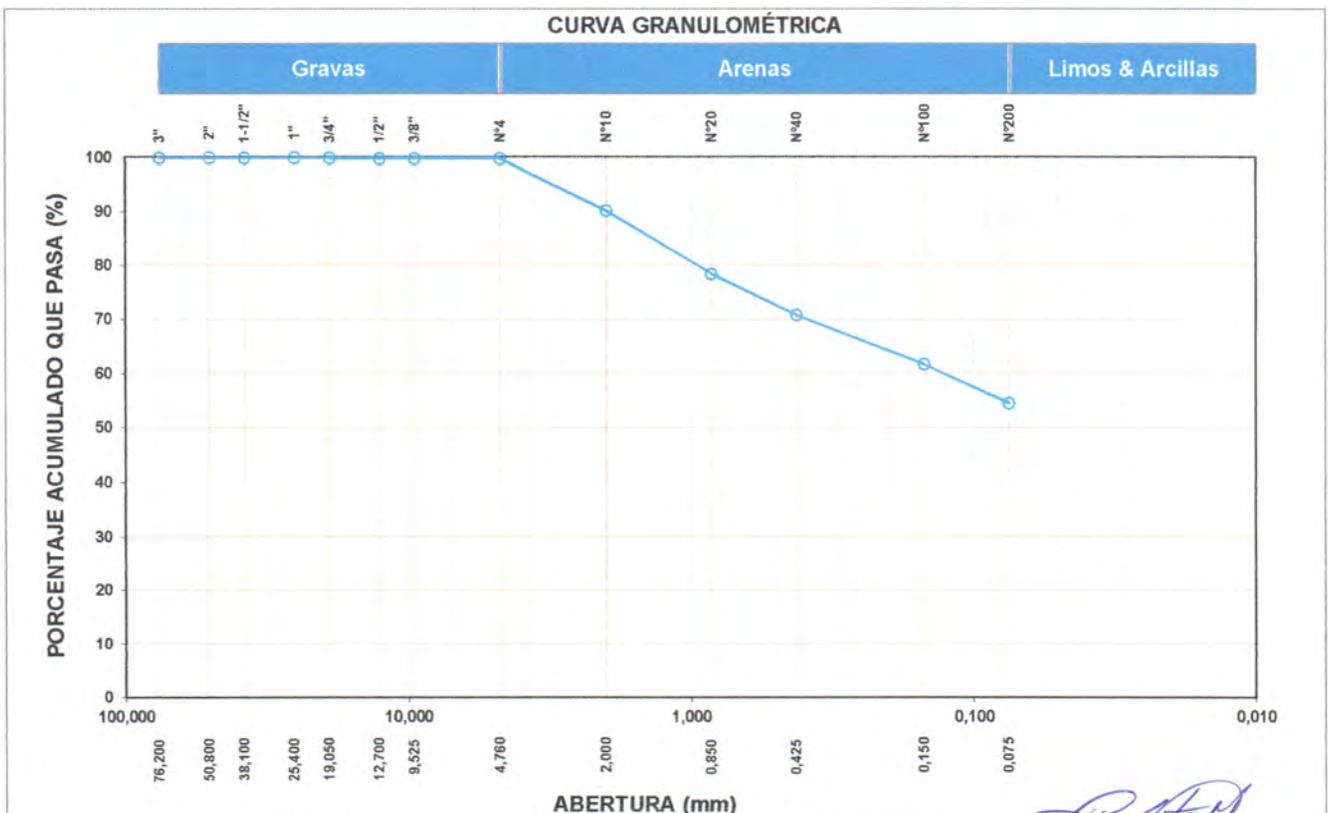
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	0,13
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	28
LP (%)	15
IP (%)	13

Humedad (%)	3,8
-------------	-----

SUCS	CL
------	----

Arcilla de baja plasticidad arenosa



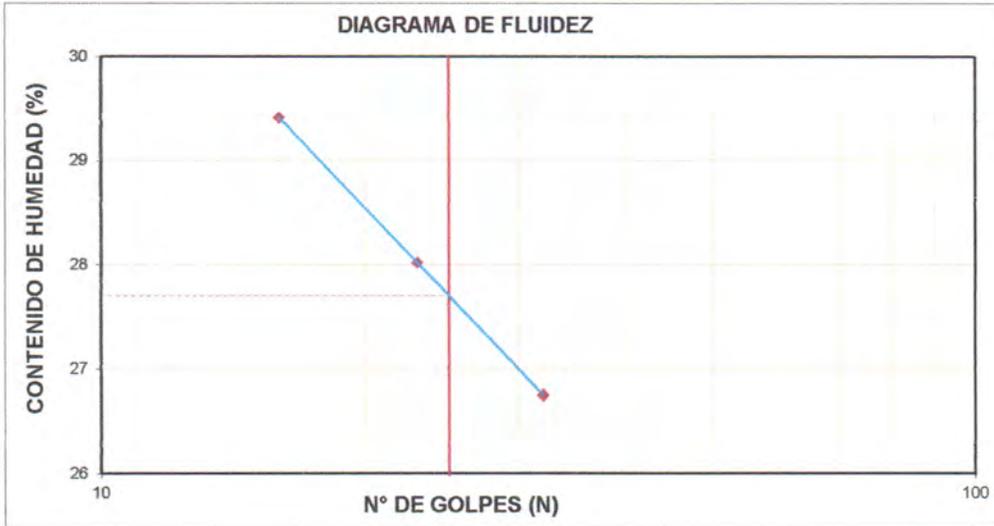
Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

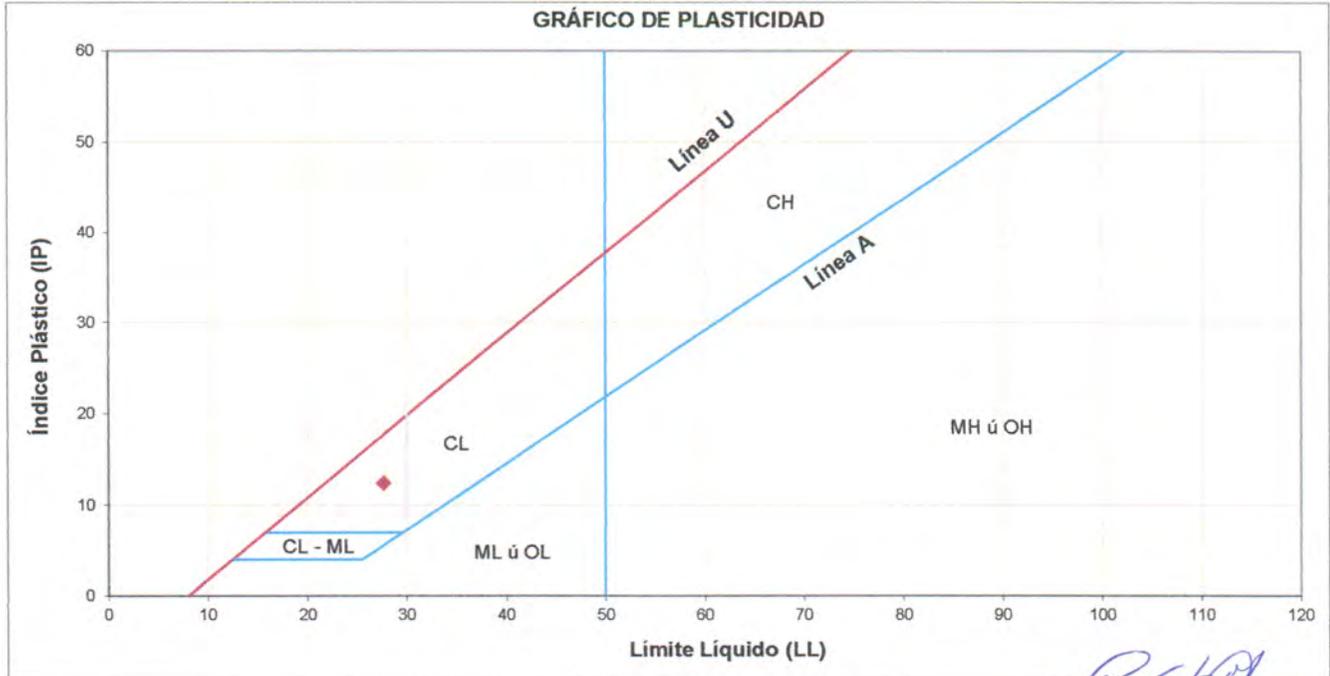
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-02	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		



Límites de Atterberg	
LL (%)	28
LP (%)	15
IP (%)	13



Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MR	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-03	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	100,0
1/2"	12,700	100,0
3/8"	9,525	100,0
Nº4	4,760	100,0
Nº10	2,000	84,5
Nº20	0,850	68,9
Nº40	0,425	59,4
Nº100	0,150	48,5
Nº200	0,075	42,4

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	0,0
Arena (%)	57,6
Limos y Arcillas (%)	42,4

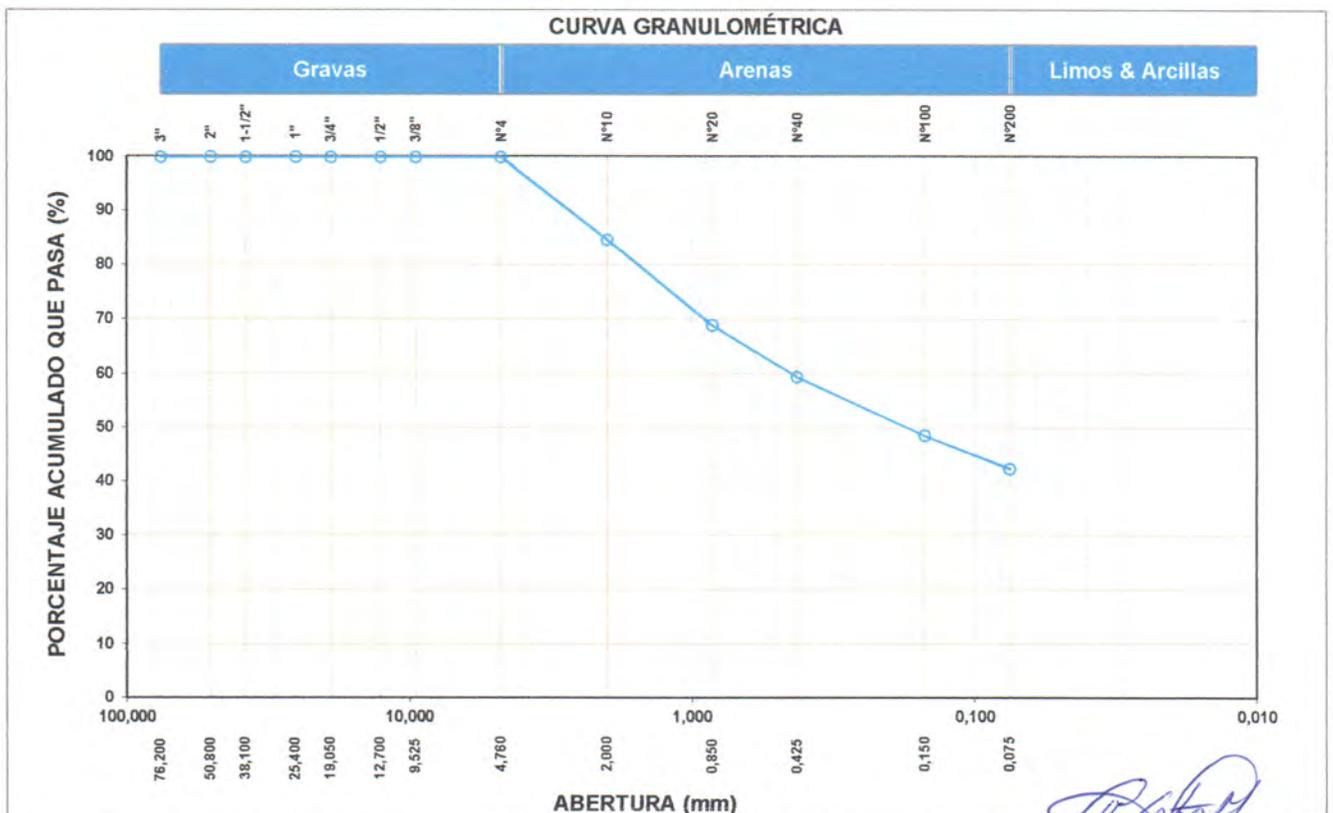
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	0,44
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	35
LP (%)	19
IP (%)	16

Humedad (%)	6,8
-------------	-----

SUCS	SC
------	----

Arena arcillosa



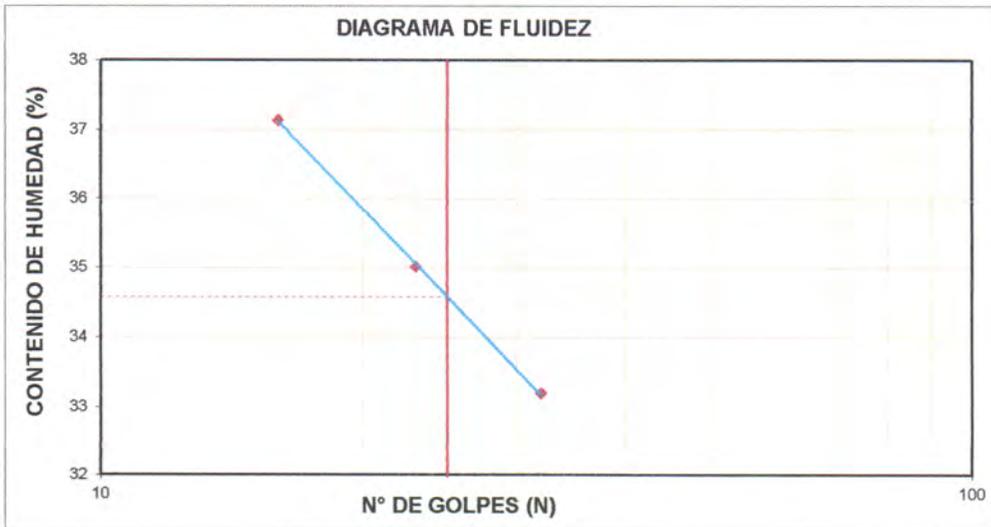
Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

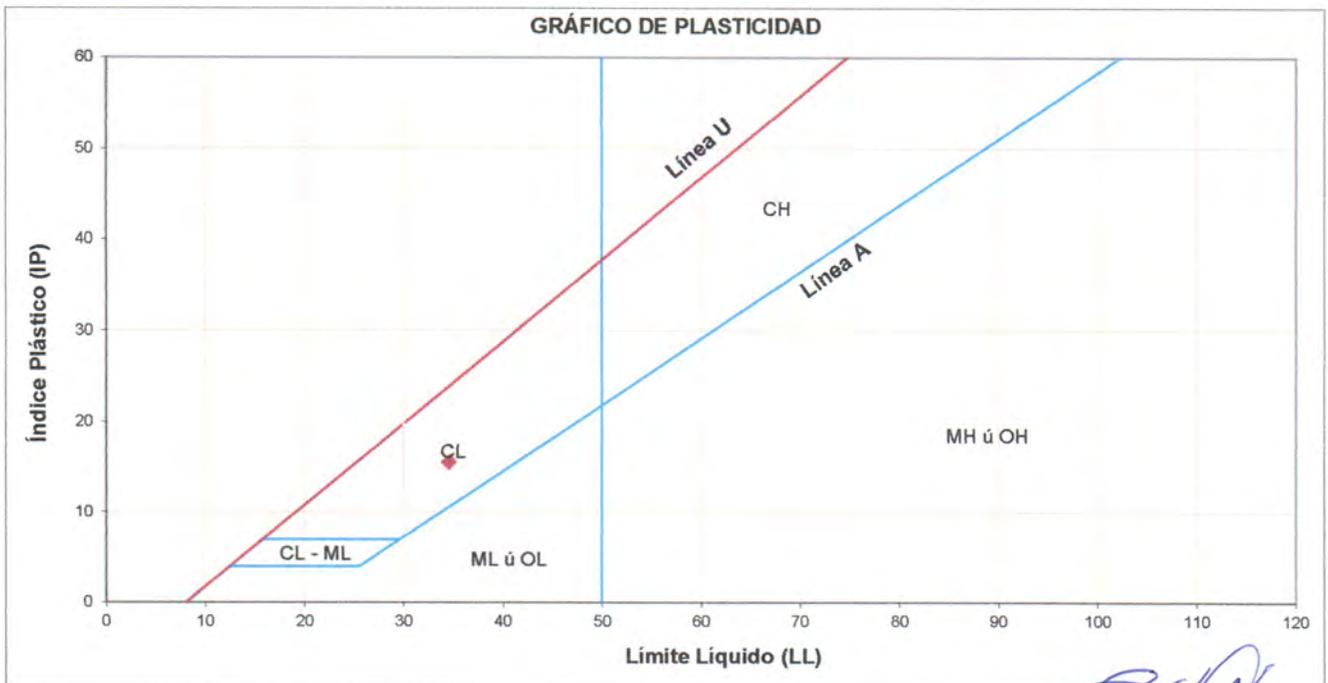
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-03	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		



Límites de Atterberg	
LL (%)	35
LP (%)	19
IP (%)	16



Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MR	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-04	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	100,0
1/2"	12,700	100,0
3/8"	9,525	100,0
Nº4	4,760	100,0
Nº10	2,000	96,0
Nº20	0,850	92,3
Nº40	0,425	90,2
Nº100	0,150	83,1
Nº200	0,075	74,6

Partículas >3" (%)	—
Grava (%)	0,0
Arena (%)	25,4
Limos y Arcillas (%)	74,6

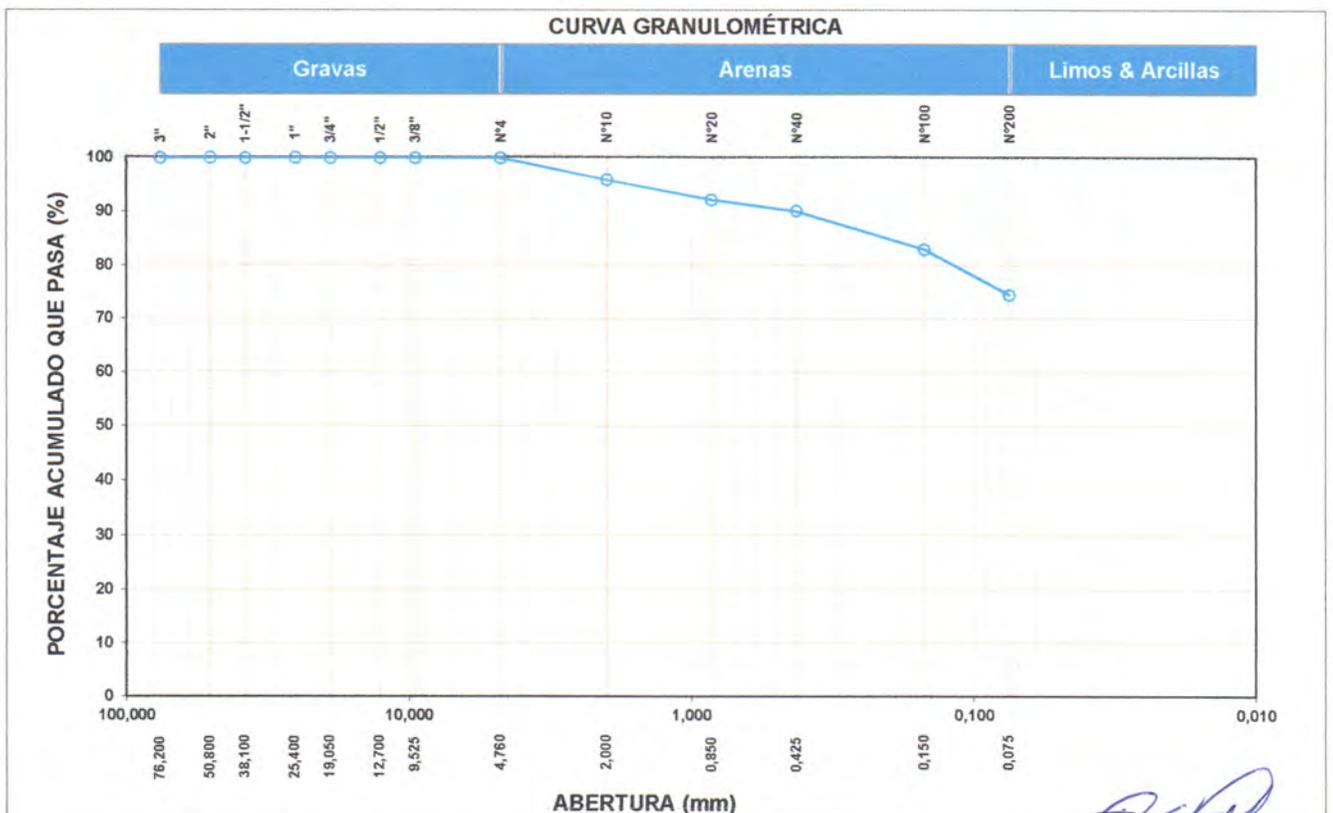
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	37
LP (%)	19
IP (%)	18

Humedad (%)	5,1
-------------	-----

SUCS	CL
------	----

Arcilla de baja plasticidad con arena



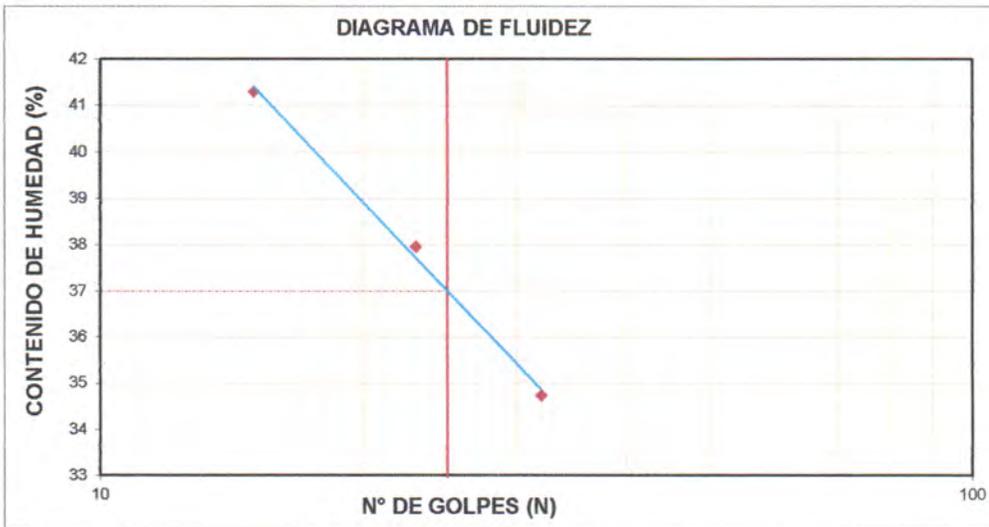
Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

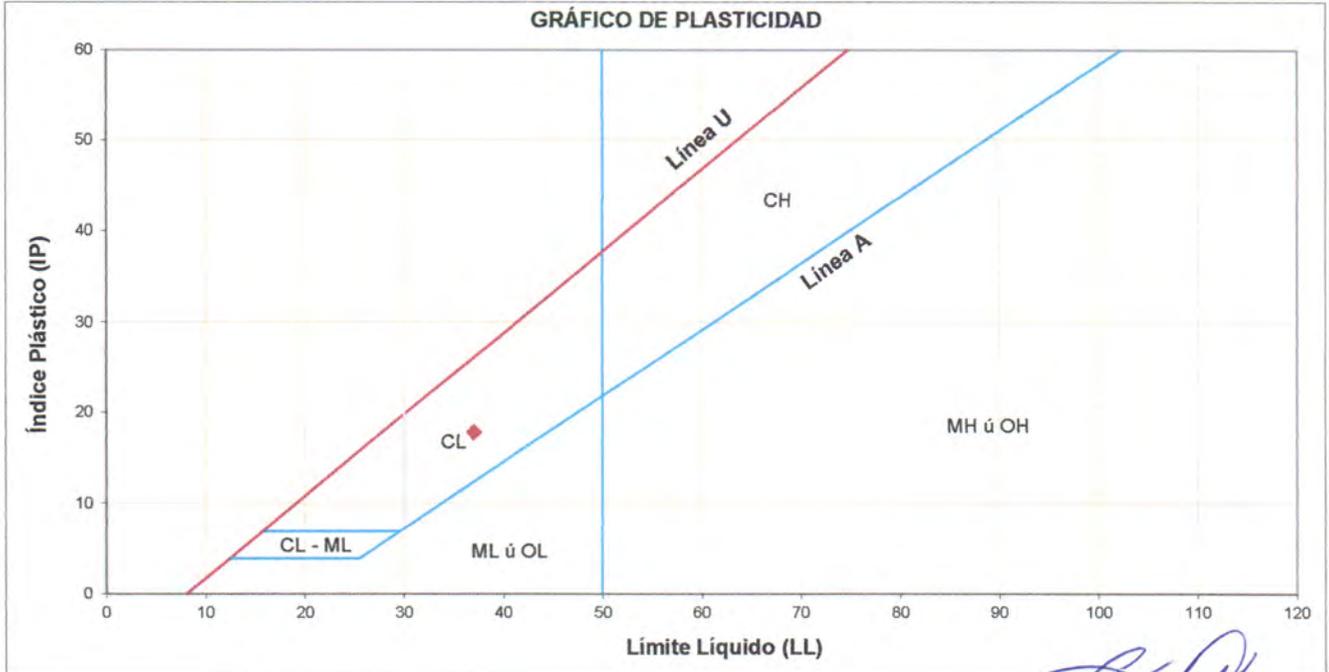
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-04	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		



Límites de Atterberg	
LL (%)	37
LP (%)	19
IP (%)	18


Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MR	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-06	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	100,0
1/2"	12,700	99,6
3/8"	9,525	99,1
Nº4	4,760	96,4
Nº10	2,000	92,3
Nº20	0,850	87,0
Nº40	0,425	83,5
Nº100	0,150	78,8
Nº200	0,075	73,5

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	3,6
Arena (%)	22,9
Limos y Arcillas (%)	73,5

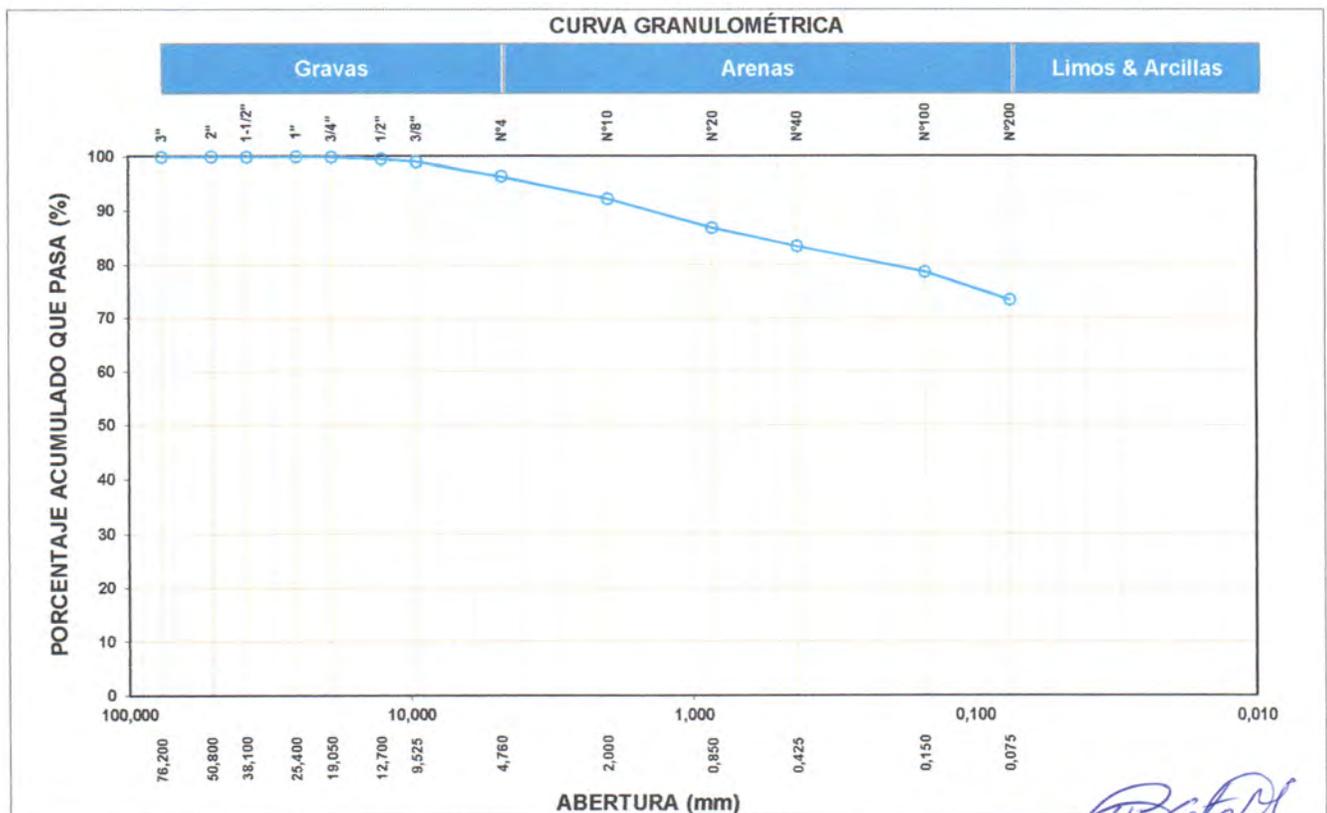
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	36
LP (%)	21
IP (%)	15

Humedad (%)	4,6
-------------	-----

SUCS	CL
------	----

Arcilla de baja plasticidad con arena



Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

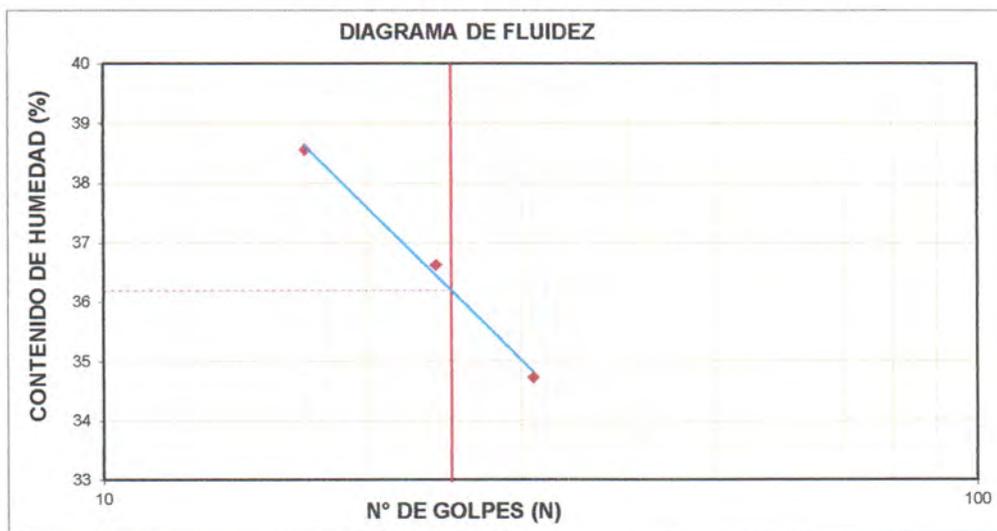
Cód. de Muestra: **SBP-06** N° de Muestra: --

Profundidad (m): -- N° de Proyecto: -

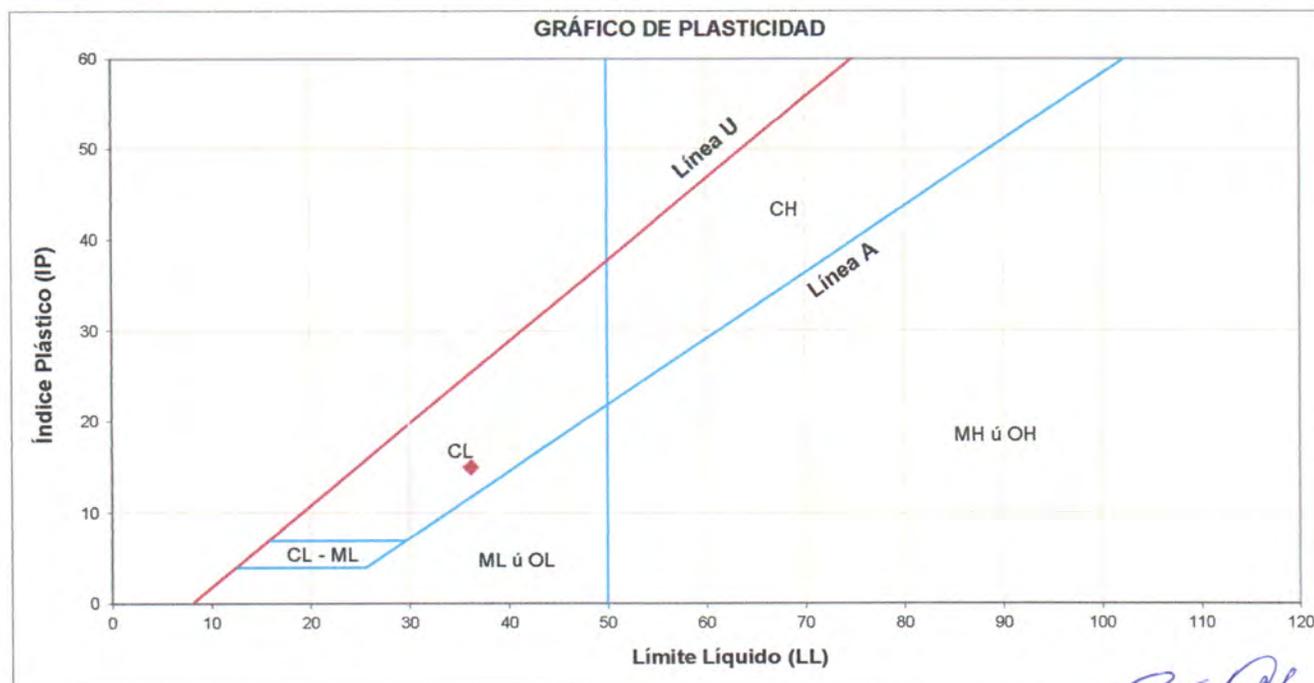
Zona: - N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad** Fecha: **18/09/2019**

Solicitado Por: **Elard Quispe**



Límites de Atterberg	
LL (%)	36
LP (%)	21
IP (%)	15



Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anndes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: **MR** Ingresado por: **ZAS** Revisado por: **CSM** N° de informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anndes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anndes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-1	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	100,0
1/2"	12,700	98,5
3/8"	9,525	94,8
Nº4	4,760	59,1
Nº10	2,000	12,9
Nº20	0,850	6,8
Nº40	0,425	3,2
Nº100	0,150	2,6
Nº200	0,075	2,1

Partículas >3" (%)	—
Grava (%)	40,9
Arena (%)	56,9
Limos y Arcillas (%)	2,1

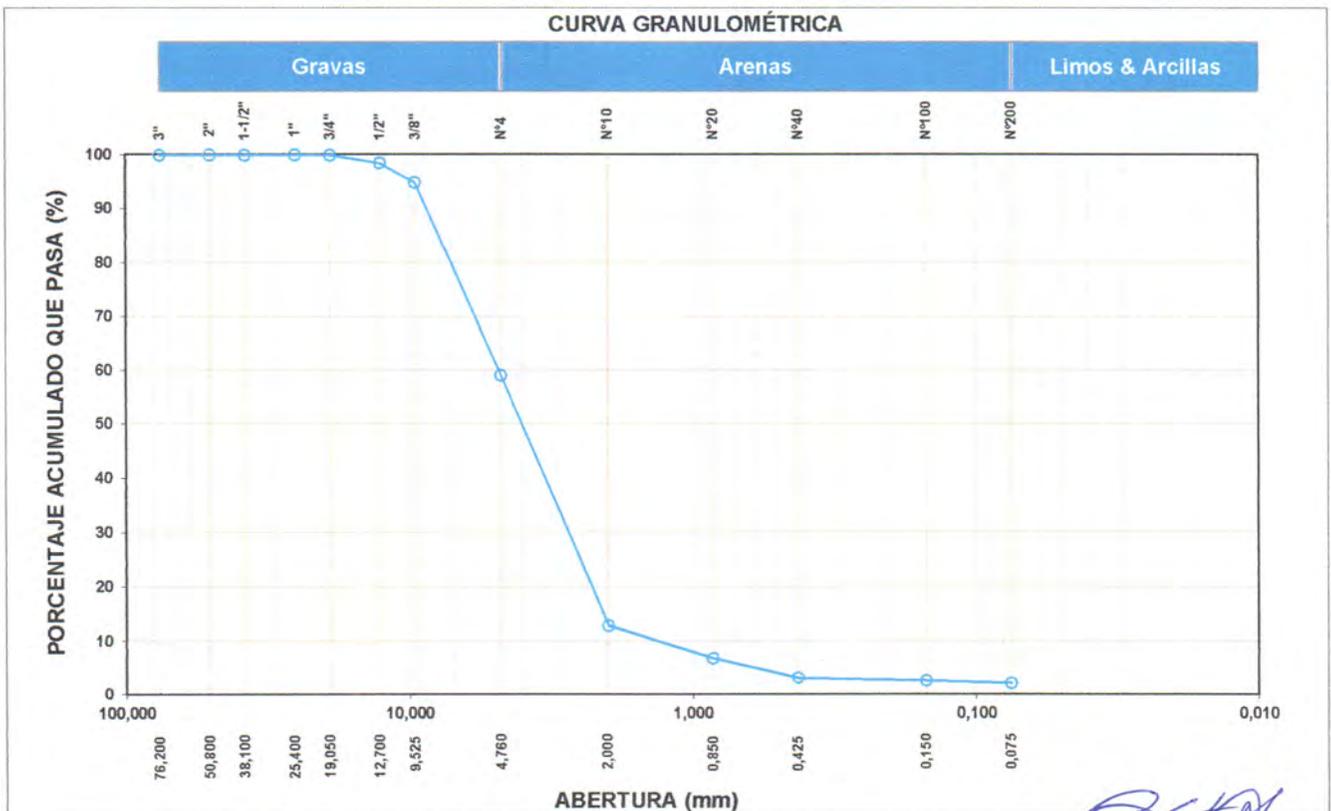
D ₁₀	1,33
D ₃₀	2,76
D ₆₀	4,85
Cu	3,66
Cc	1,18

Límites de Atterberg:	
LL (%)	NP
LP (%)	NP
IP (%)	NP

Humedad (%)	0,2
-------------	-----

SUCS	SP
------	----

Arena pobremente gradada con grava



Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-2	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	100,0
3/4"	19,050	94,0
1/2"	12,700	51,2
3/8"	9,525	31,6
Nº4	4,760	3,3
Nº10	2,000	0,2
Nº20	0,850	0,2
Nº40	0,425	0,2
Nº100	0,150	0,2
Nº200	0,075	0,2

Partículas >3" (%)	--
Grava (%)	96,7
Arena (%)	3,2
Limos y Arcillas (%)	0,2

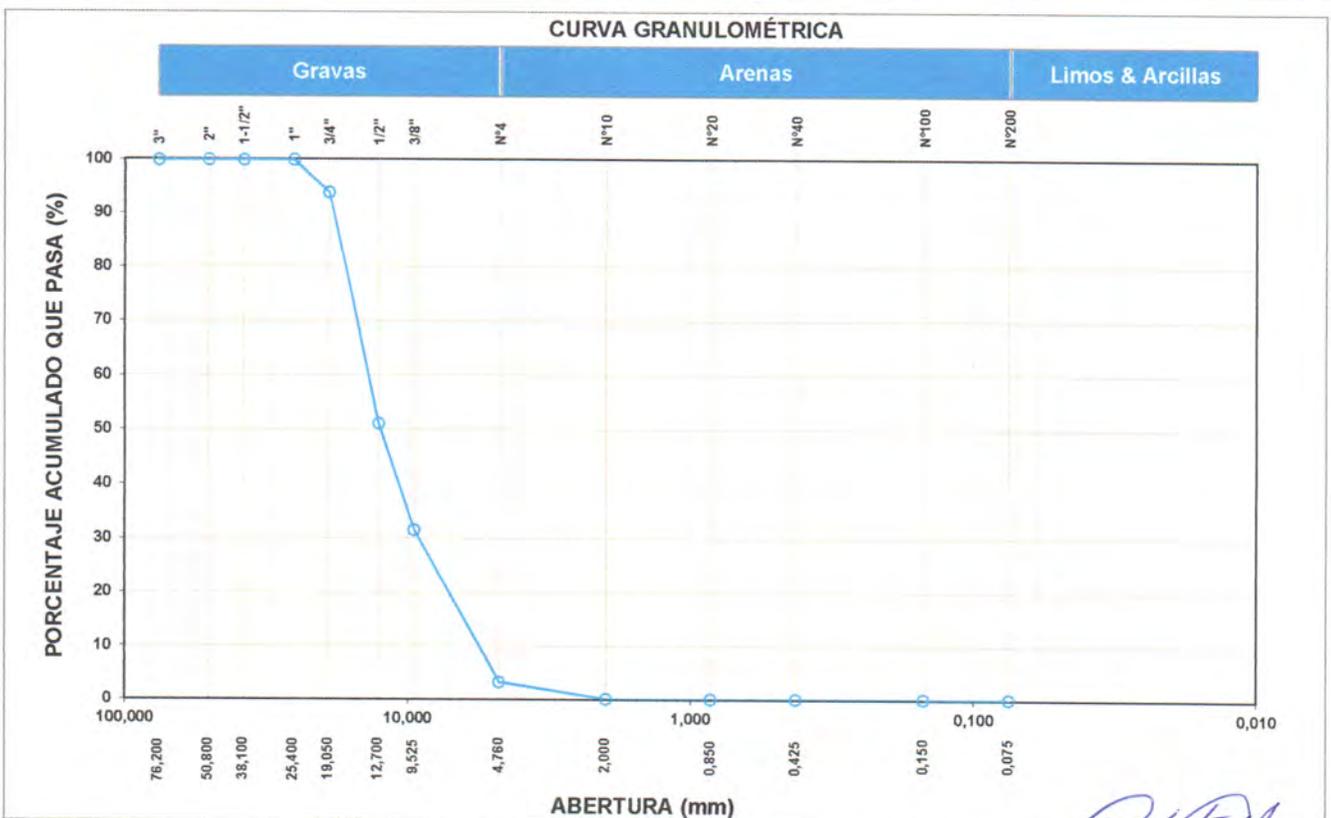
D ₁₀	5,61
D ₃₀	9,16
D ₆₀	13,81
Cu	2,46
Cc	1,08

Límites de Atterberg:	
LL (%)	NP
LP (%)	NP
IP (%)	NP

Humedad (%)	0,4
-------------	-----

SUCS	GP
------	----

Grava pobremente gradada



Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-8	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	91,2
3/4"	19,050	80,9
1/2"	12,700	63,2
3/8"	9,525	55,3
Nº4	4,760	40,0
Nº10	2,000	26,1
Nº20	0,850	19,2
Nº40	0,425	16,5
Nº100	0,150	13,3
Nº200	0,075	11,4

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	60,0
Arena (%)	28,6
Limos y Arcillas (%)	11,4

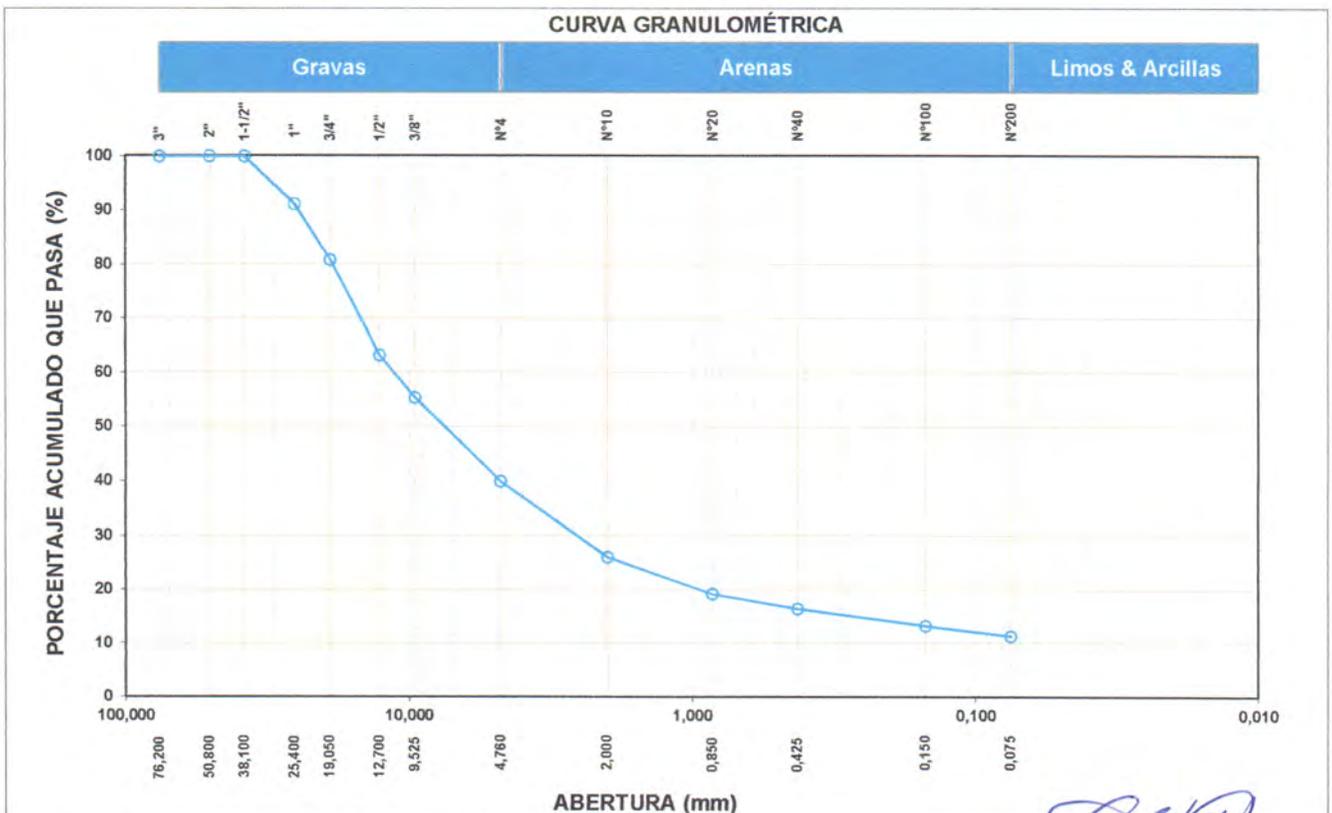
D ₁₀	
D ₃₀	2,55
D ₆₀	11,31
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	31
LP (%)	18
IP (%)	13

Humedad (%)	2,7
-------------	-----

SUCS	GP-GC
------	-------

Grava pobremente gradada con arcilla y arena


Observación:

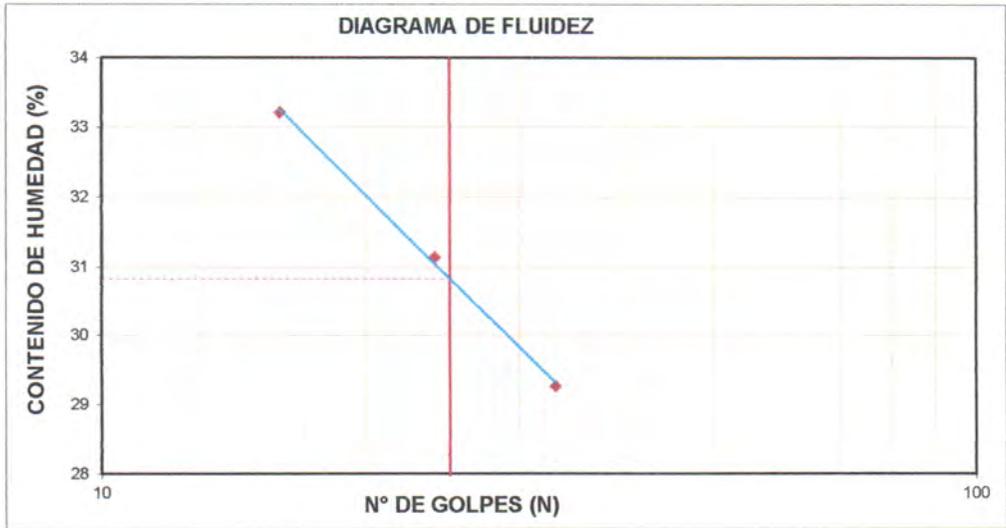
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

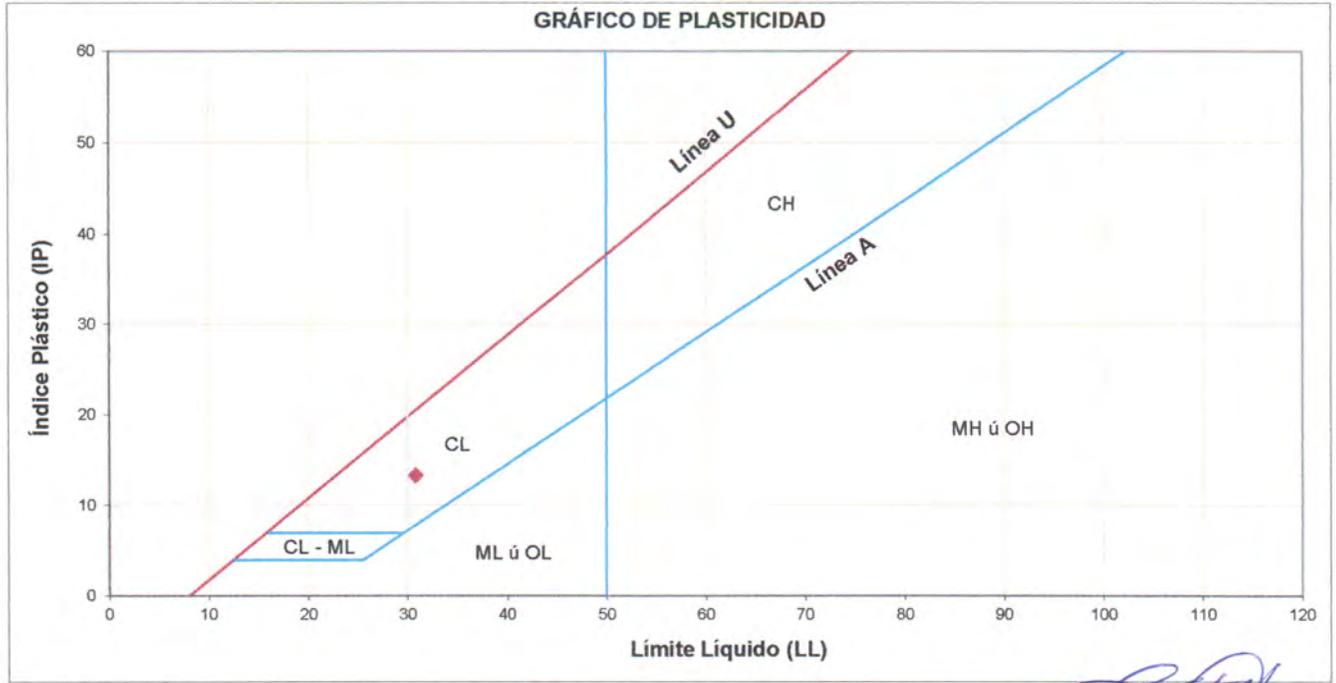
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-8	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		



Límites de Atterberg	
LL (%)	31
LP (%)	18
IP (%)	13



Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MR	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **CD-9**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo Granular**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	100,0
1"	25,400	96,7
3/4"	19,050	92,6
1/2"	12,700	84,3
3/8"	9,525	78,1
N°4	4,760	64,7
N°10	2,000	52,1
N°20	0,850	45,7
N°40	0,425	43,3
N°100	0,150	40,6
N°200	0,075	38,2

Partículas >3" (%)	
Grava (%)	35,3
Arena (%)	26,5
Limos y Arcillas (%)	38,2

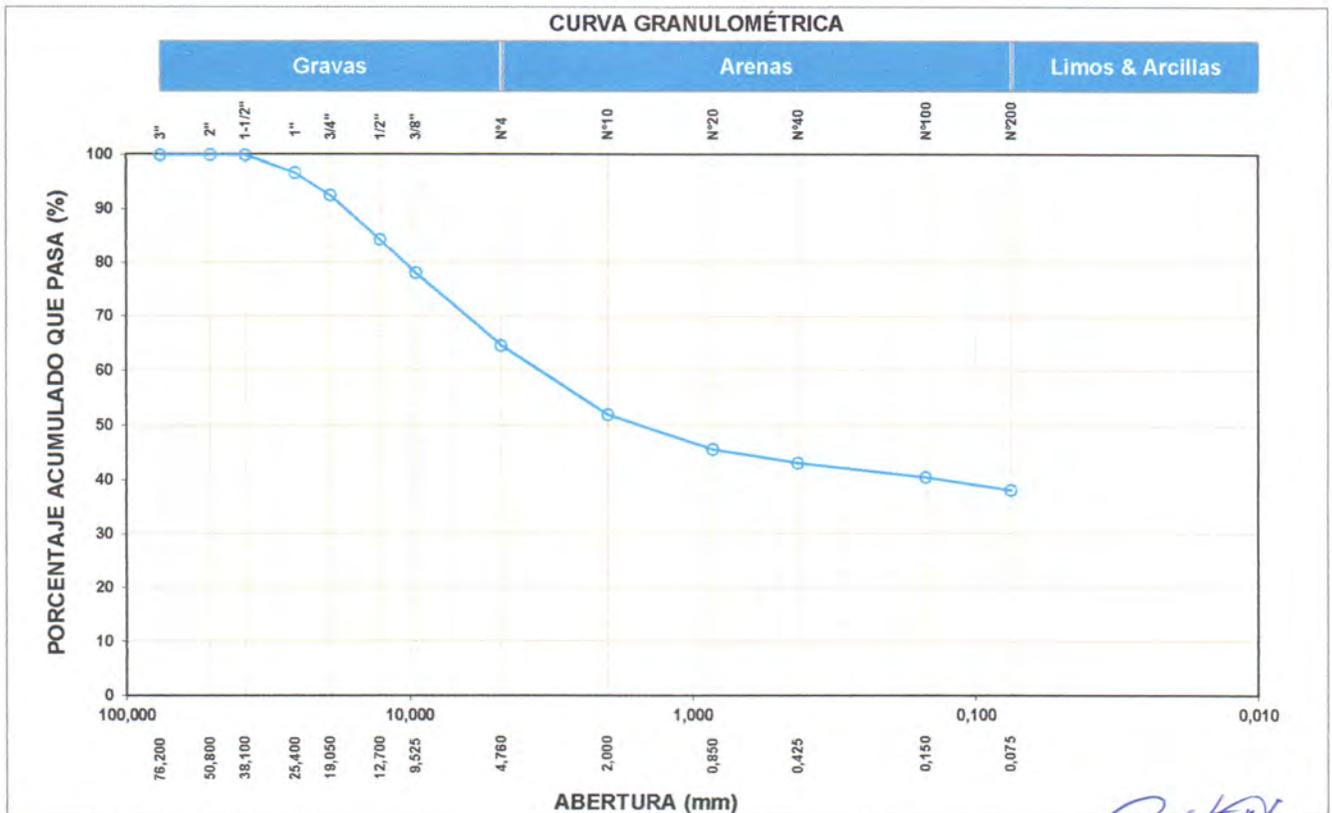
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	3,45
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	29
LP (%)	16
IP (%)	13

Humedad (%)	5,8
-------------	-----

SUCS	GC
------	----

Grava arcillosa con arena


Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

ZAS

Revisado por:

CSM

N° de informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Cód. de Muestra: **CD-9**

Nº de Muestra: --

Profundidad (m): --

Nº de Proyecto: -

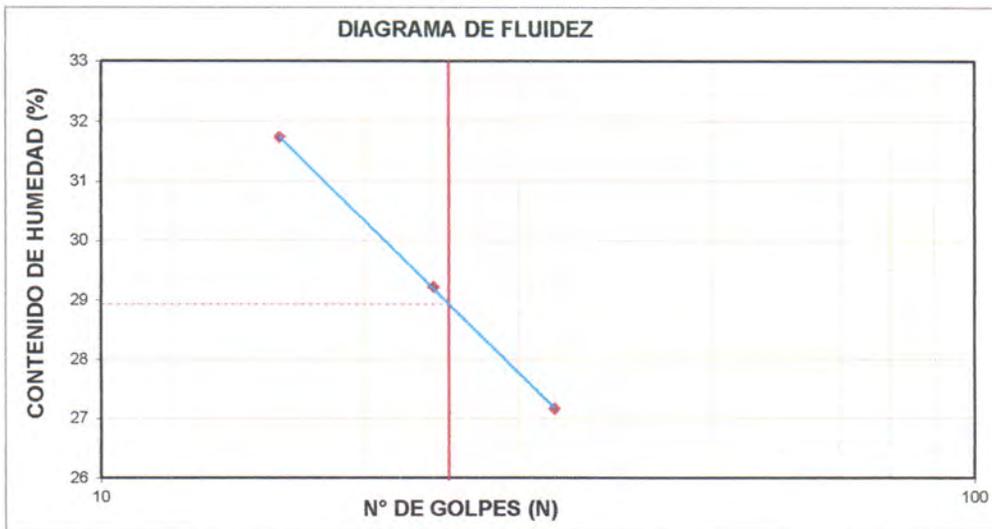
Zona: -

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

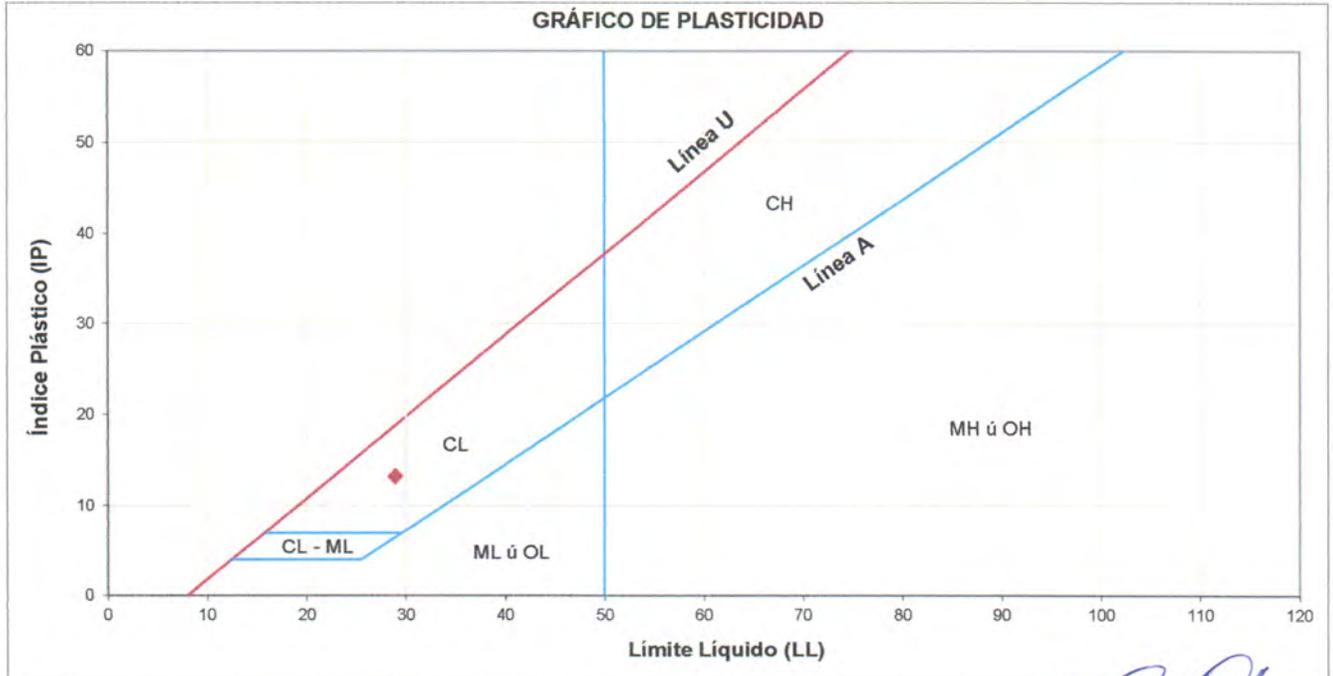
Descripción: **Suelo Granular**

Fecha: **18/09/2019**

Solicitado Por: **Elard Quispe**



Límites de Atterberg	
LL (%)	29
LP (%)	16
IP (%)	13



Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MR

Ingresado por:

ZAS

Revisado por:

CSM

Nº de informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-9	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	99,2
1"	25,400	93,6
3/4"	19,050	85,1
1/2"	12,700	71,6
3/8"	9,525	65,2
Nº4	4,760	52,7
Nº10	2,000	40,3
Nº20	0,850	36,4
Nº40	0,425	35,7
Nº100	0,150	34,8
Nº200	0,075	33,5

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	47,3
Arena (%)	19,2
Limos y Arcillas (%)	33,5

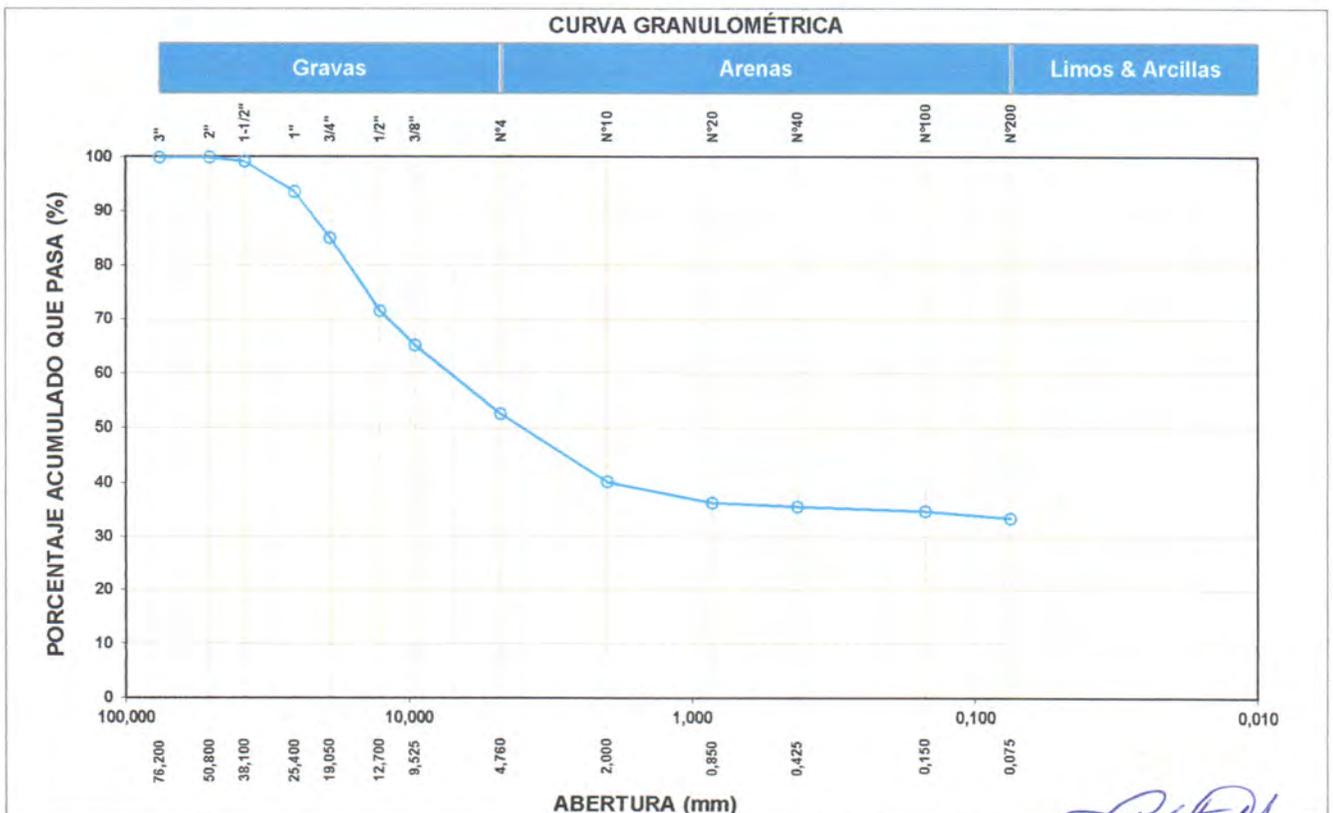
D ₁₀	
D ₃₀	
D ₆₀	7,13
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg:	
LL (%)	30
LP (%)	16
IP (%)	14

Humedad (%)	3,7
-------------	-----

SUCS	GC
------	----

Grava arcillosa con arena


Observación:

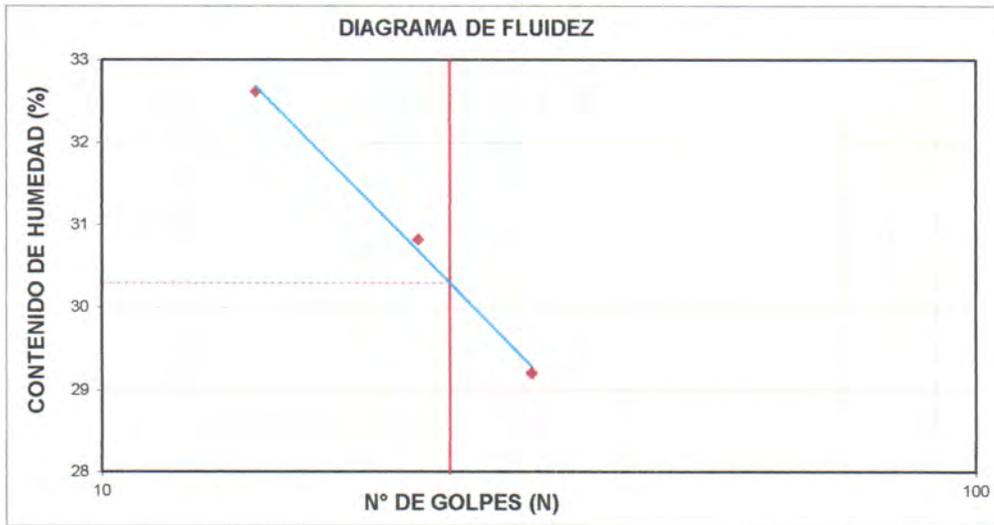
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

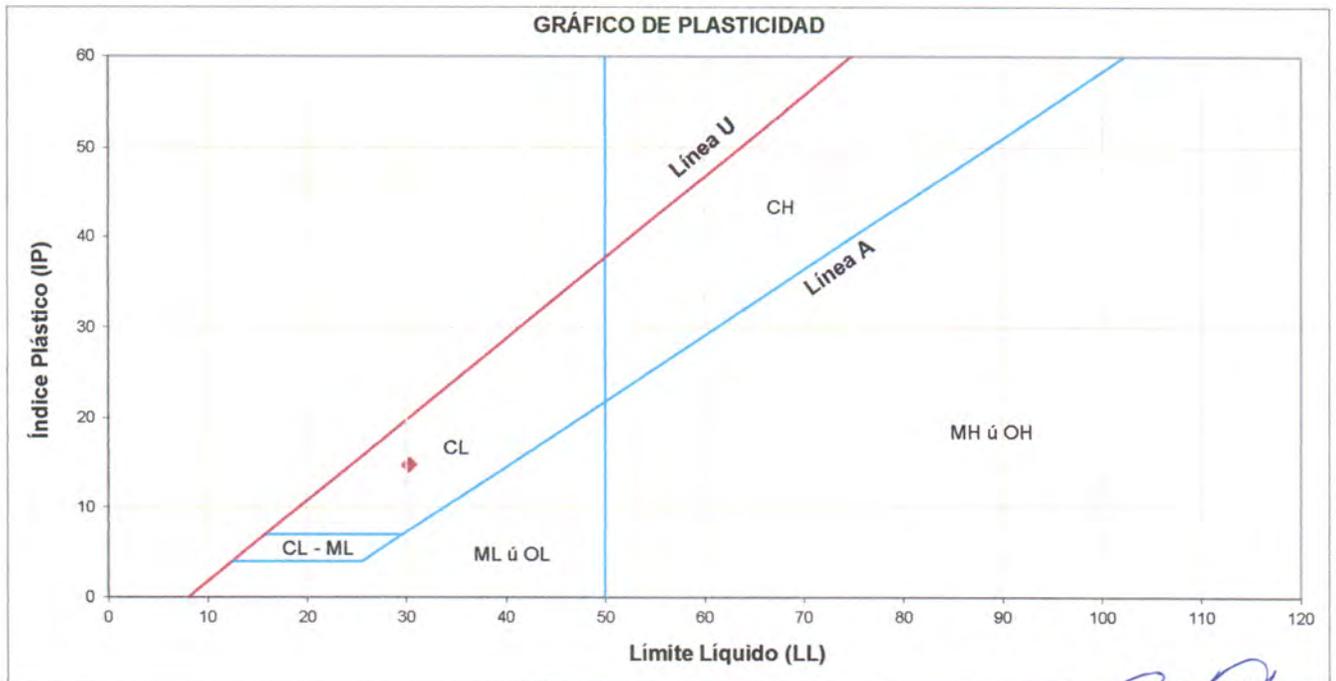
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-9	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		



Límites de Atterberg	
LL (%)	30
LP (%)	16
IP (%)	14



Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anndes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MR	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anndes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anndes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-3	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	100,0
1 1/2"	38,100	98,9
1"	25,400	91,2
3/4"	19,050	79,8
1/2"	12,700	62,9
3/8"	9,525	51,5
Nº4	4,760	31,0
Nº10	2,000	24,0
Nº20	0,850	18,0
Nº40	0,425	12,9
Nº100	0,150	6,8
Nº200	0,075	4,4

Partículas >3" (%)	--
Grava (%)	69,0
Arena (%)	26,6
Limos y Arcillas (%)	4,4

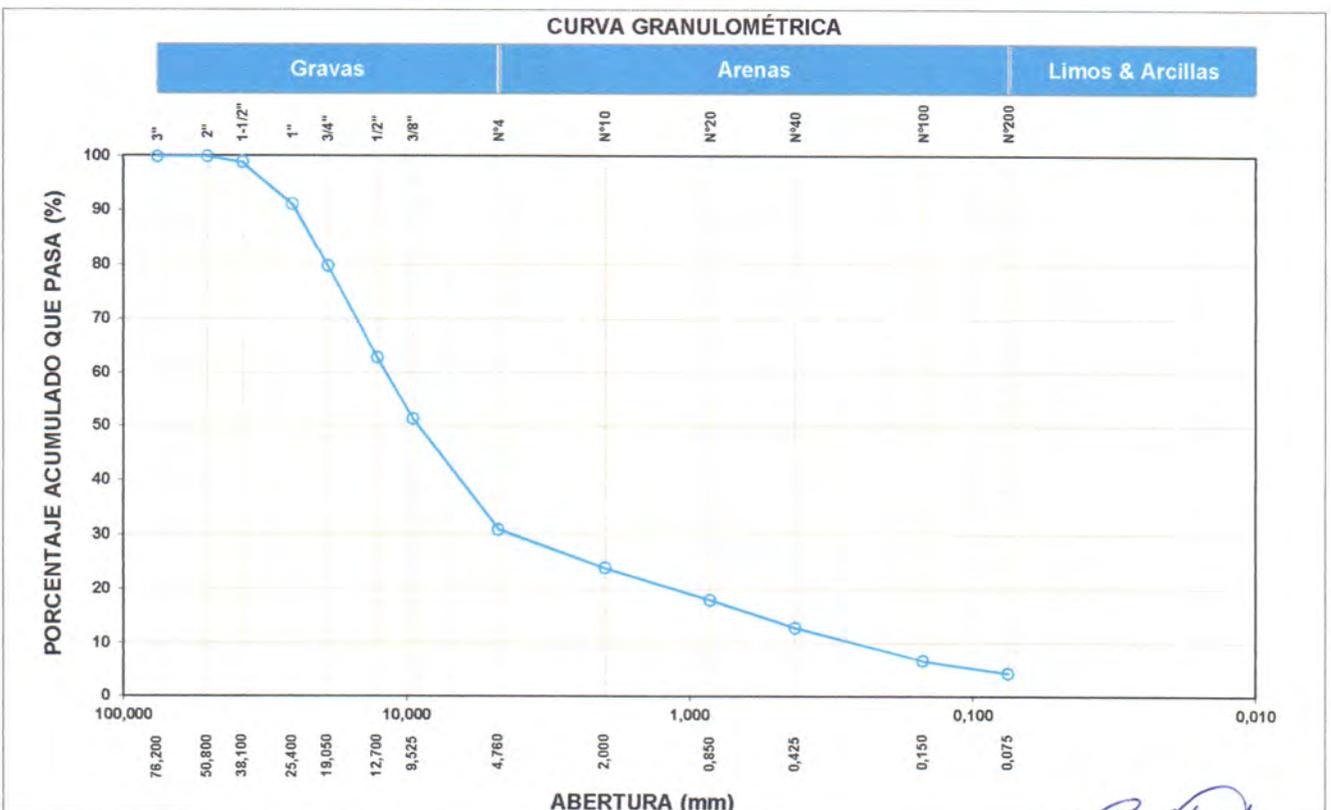
D ₁₀	0,26
D ₃₀	4,19
D ₆₀	11,80
Cu	45,55
Cc	5,75

Límites de Atterberg:	
LL (%)	NP
LP (%)	NP
IP (%)	NP

Humedad (%)	1,0
-------------	-----

SUCS	GP
------	----

Grava pobremente gradada con arena



Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

ANEXO B.2: ENSAYOS PROCTOR ESTÁNDAR

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **SBP-01**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

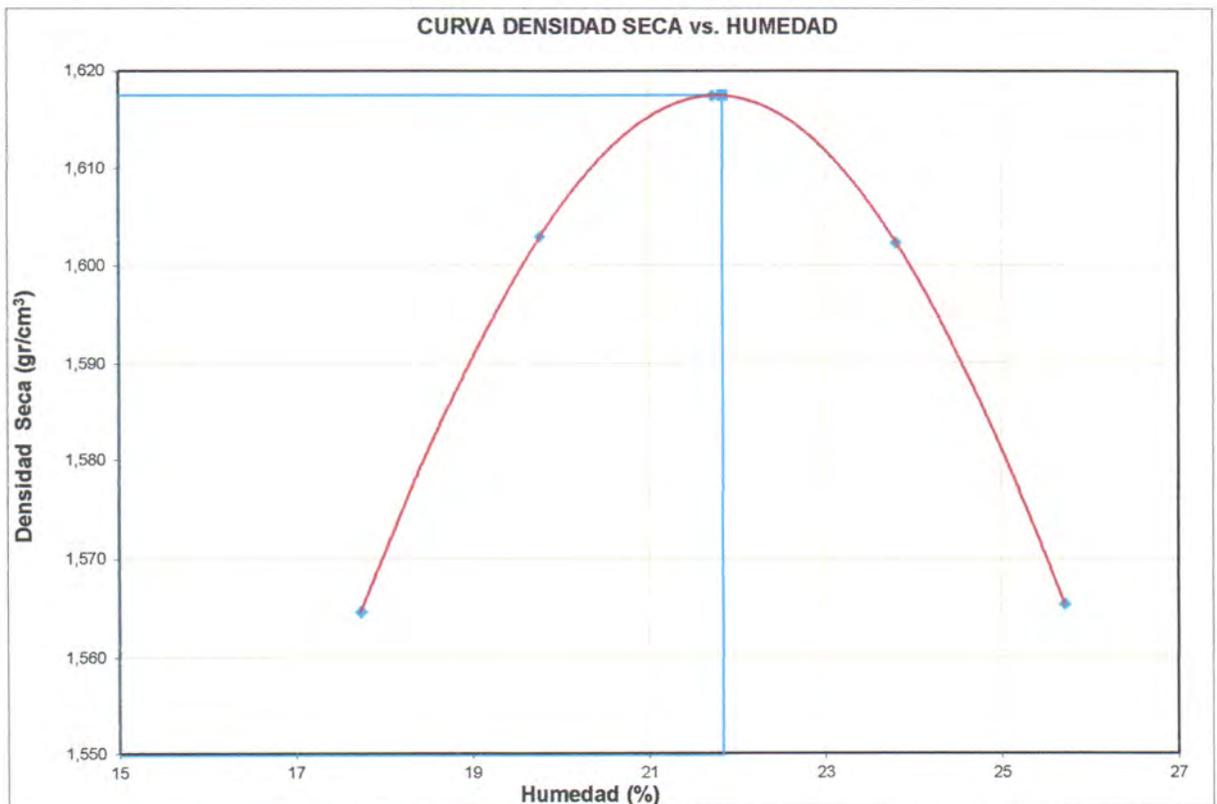
 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7
Densidad seca (gr/cm ³)	1,565	1,603	1,617	1,602	1,565		
Humedad(%)	17,7	19,8	21,7	23,8	25,7		



Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	1,618
Óptimo Contenido de Humedad (%)	21,8

Fraccion Sobre tamaño	
GS (Bulk) =	---
w(%) =	---

Máx. Dens. Seca Corregida (gr/cm ³)	---
Opt. Cont. de Humedad Corregida (%)	---

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

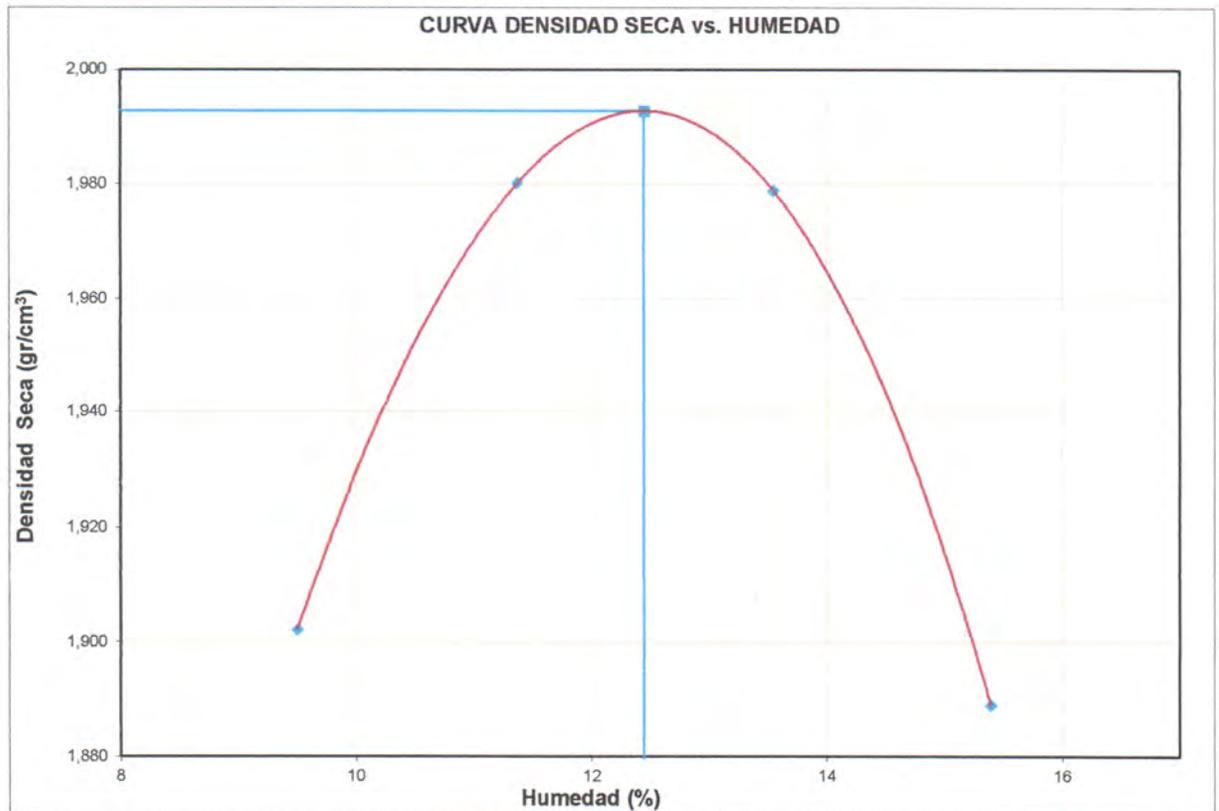

Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP	Ingresado por: ZAS	Revisado por: CSM	N° de informe: LAB-19.10.041
--------------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------------------

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-02	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Prueba Nº	1	2	3	4	5	6	7
Densidad seca (gr/cm ³)	1,902	1,980	1,979	1,889			
Humedad(%)	9,5	11,4	13,5	15,4			



Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	1,993
Óptimo Contenido de Humedad (%)	12,4

Fraccion Sobre tamaño	
GS (Bulk) =	--
w(%) =	--

Máx. Dens. Seca Corregida (gr/cm ³)	--
Opt. Cont. de Humedad Corregida (%)	--


Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

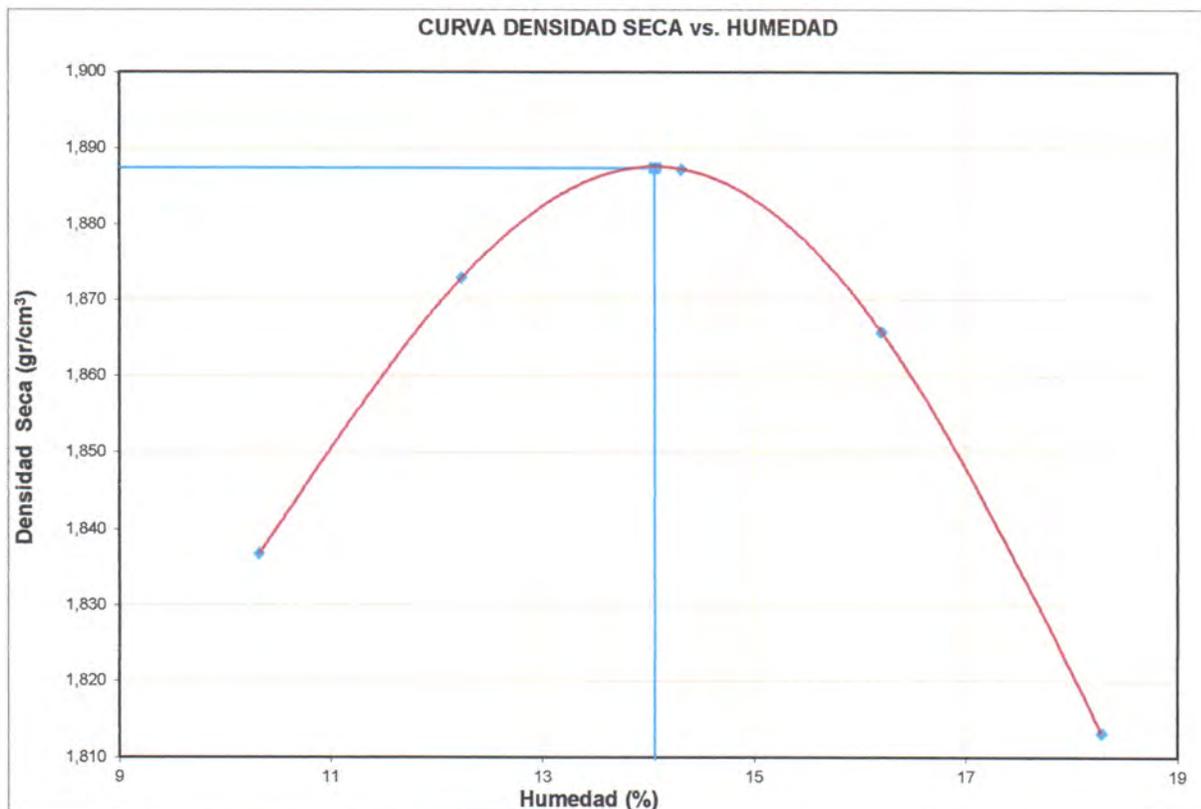
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	N° de Muestra:	--
Ubicación del Proyecto:	-	N° de Proyecto:	-
Cód. de Muestra:	SBP-03	N° de Informe:	LAB-19.10.041
Profundidad (m):	--	Fecha:	18/09/2019
Zona:	-		
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad		
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7
Densidad seca (gr/cm ³)	1,837	1,873	1,887	1,866	1,813		
Humedad(%)	10,3	12,2	14,3	16,2	18,3		



Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	1,888
Óptimo Contenido de Humedad (%)	14,1

Fracción Sobre tamaño	
GS (Bulk) =	---
w(%) =	---

Máx. Dens. Seca Corregida (gr/cm ³)	---
Opt. Cont. de Humedad Corregida (%)	---


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Boto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **SBP-04**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

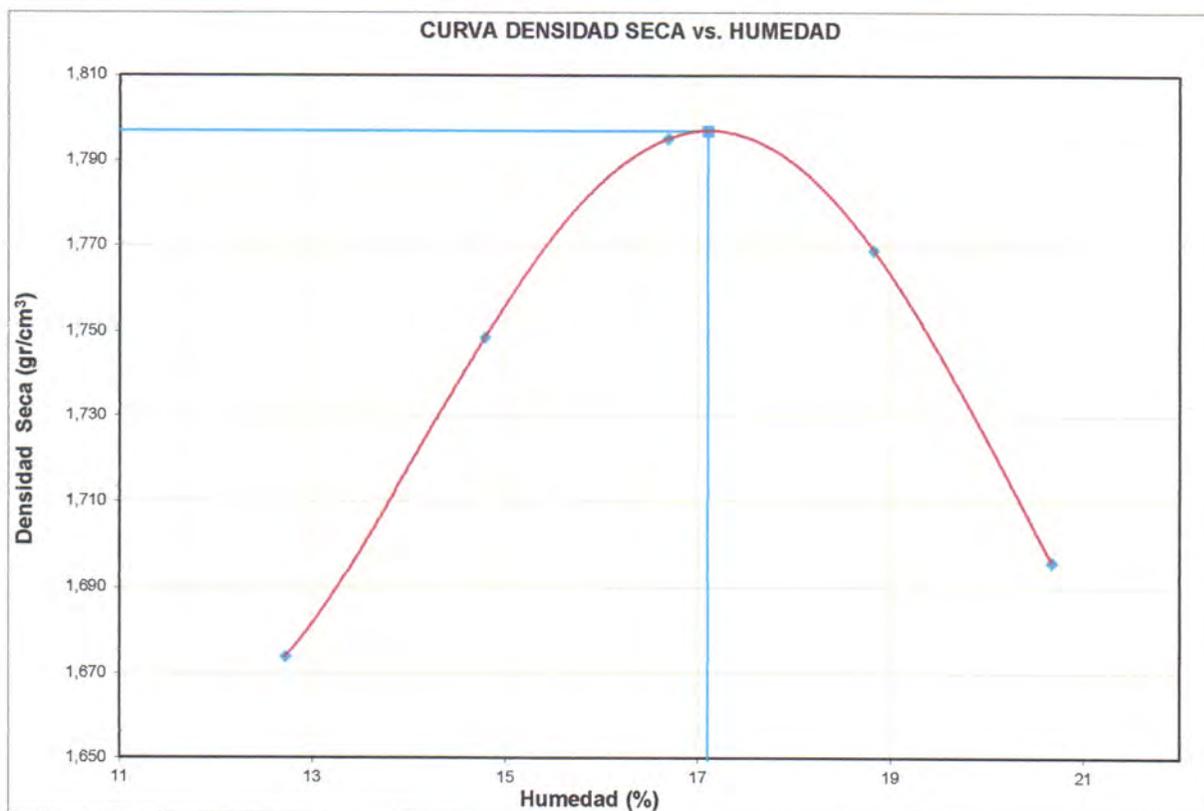
 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7
Densidad seca (gr/cm ³)	1,674	1,749	1,795	1,769	1,696		
Humedad(%)	12,7	14,8	16,7	18,8	20,7		



Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	1,797
Óptimo Contenido de Humedad (%)	17,1

Fracción Sobre tamaño	
GS (Bulk) =	---
w(%) =	---

Máx. Dens. Seca Corregida (gr/cm ³)	---
Opt. Cont. de Humedad Corregida (%)	---

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP	Ingresado por: ZAS	Revisado por: CSM	N° de informe: LAB-19.10.041
--------------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------------------

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Analisis de las condiciones de estabilidad fisica para sistemas de cobertura con geosinteticos en el cierre de minas**

Cliente: --

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **SBP-06**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

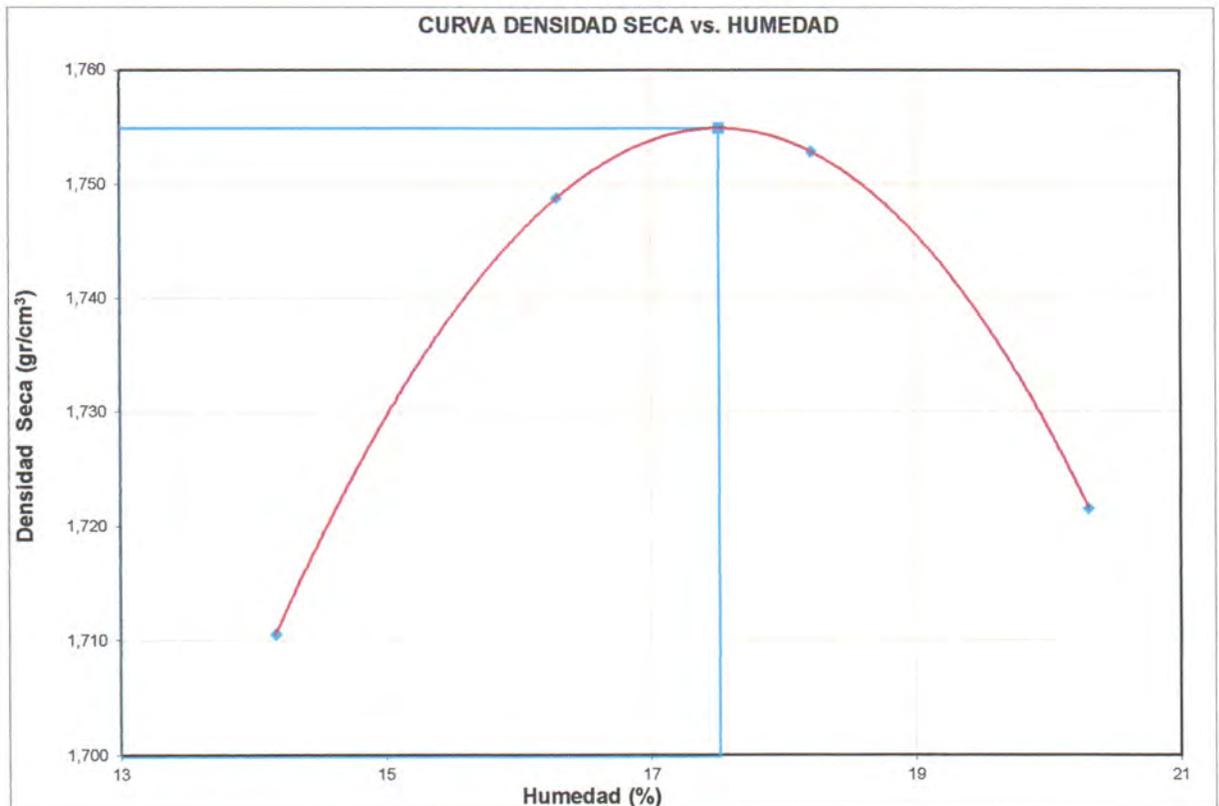
 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7
Densidad seca (gr/cm ³)	1,711	1,749	1,753	1,722			
Humedad(%)	14,2	16,3	18,2	20,3			



Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	1,755
Óptimo Contenido de Humedad (%)	17,5

Fraccion Sobre tamaño		
GS (Bulk)	=	---
w(%)	=	---

Máx. Dens. Seca Corregida (gr/cm ³)	---
Opt. Cont. de Humedad Corregida (%)	---

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° de informe:
MP	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

ANEXO B.3: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE PARED RÍGIDA

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **CD-1**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo Granular**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado por: **Elard Quispe**

Estado de la muestra

Colocada con ligera compactación

(*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	SP
------	----

Datos del Ensayo

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,46	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,46
Altura (cm)	37,20	Humedad Inicial (%)	0,2	Humedad final (%)	30,4
Gravedad de Sólidos	2,62	Saturación inicial (%)	0,6	Saturación final (%)	99

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,005	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,0	82,8	0,2	70,49	310,0	4,40	1,1E+00	27,0	9,5E-01
83,0	82,8	0,2	70,46	310,0	4,40	1,1E+00	27,0	9,5E-01
83,0	82,8	0,2	70,42	310,0	4,40	1,1E+00	27,0	9,5E-01
83,0	82,8	0,2	70,49	310,0	4,40	1,1E+00	27,0	9,5E-01
Promedio (cm/s) :								9,5E-01 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,007	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,1	82,8	0,3	70,47	505,0	7,17	1,4E+00	27,0	1,2E+00
83,1	82,8	0,3	70,42	505,0	7,17	1,5E+00	27,0	1,2E+00
83,1	82,8	0,3	70,49	505,0	7,16	1,4E+00	27,0	1,2E+00
83,1	82,8	0,3	70,39	505,0	7,17	1,5E+00	27,0	1,2E+00
Promedio (cm/s) :								1,2E+00 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,171	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
89,2	82,8	6,4	70,45	800,0	11,36	9,0E-02	27,0	7,7E-02
89,2	82,8	6,4	70,47	800,0	11,35	9,0E-02	27,0	7,7E-02
89,2	82,8	6,4	70,43	800,0	11,36	9,0E-02	27,0	7,7E-02
89,2	82,8	6,4	70,43	800,0	11,36	9,0E-02	27,0	7,7E-02
Promedio (cm/s) :								7,7E-02 (*)

Notas:

- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
- 2) Material colocado con ligera compactación
- 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

BT

Ingresado por:

ZAS

Revisado por:

CSM

N° de informe:

LAB-19.10.041

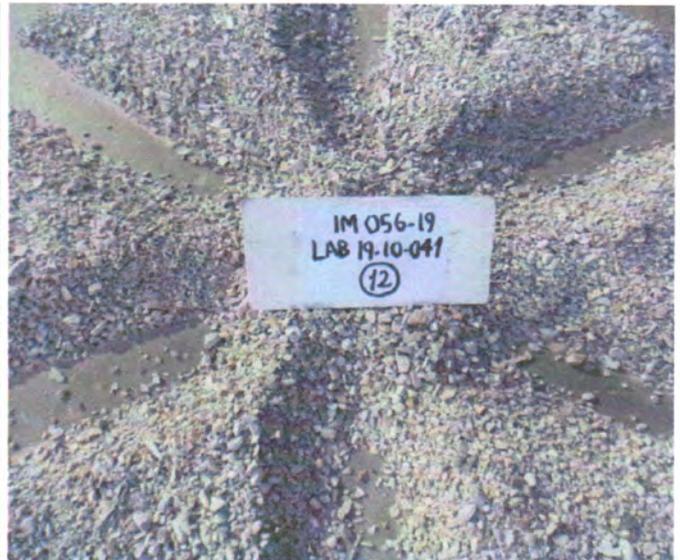
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-1	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.



Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.



Ensayo en proceso.

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-2	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado por:	Elard Quispe		

Estado de la muestra Colocada con ligera compactación

(*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	GP
------	----

Datos del Ensayo

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,51	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,51
Altura (cm)	39,40	Humedad Inicial (%)	0,4	Humedad final (%)	24,9
Gravedad de Sólidos	2,76	Saturación inicial (%)	1,2	Saturación final (%)	82,5

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,005	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,1	82,9	0,2	70,40	200,0	2,84	7,6E-01	27,0	6,5E-01
83,1	82,9	0,2	70,45	200,0	2,84	7,6E-01	27,0	6,5E-01
83,1	82,9	0,2	70,47	200,0	2,84	7,6E-01	27,0	6,5E-01
83,1	82,9	0,2	70,49	200,0	2,84	7,6E-01	27,0	6,5E-01
Promedio (cm/s) :								6,5E-01 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,006	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,2	82,9	0,3	70,49	440,0	6,24	1,3E+00	27,0	1,1E+00
83,2	82,9	0,3	70,48	440,0	6,24	1,3E+00	27,0	1,1E+00
83,2	82,9	0,3	70,47	440,0	6,24	1,3E+00	27,0	1,1E+00
83,2	82,9	0,3	70,49	440,0	6,24	1,3E+00	27,0	1,1E+00
Promedio (cm/s) :								1,1E+00 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,008	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,2	82,9	0,3	70,42	690,0	9,80	1,7E+00	27,0	1,5E+00
83,2	82,9	0,3	70,41	690,0	9,80	1,8E+00	27,0	1,5E+00
83,2	82,9	0,3	70,46	690,0	9,79	1,7E+00	27,0	1,5E+00
83,2	82,9	0,3	70,44	690,0	9,80	1,7E+00	27,0	1,5E+00
Promedio (cm/s) :								1,5E+00 (*)

- Notas:**
- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
 - 2) Material colocado con ligera compactación
 - 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante



Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Boto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-2	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.

Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.

Ensayo en proceso.

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **CD-8**

N° de Muestra: -

Profundidad (m): -

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo Granular**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado por: **Elard Quispe**

Estado de la muestra

Colocada con ligera compactación

(*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	GP-GC
------	--------------

Datos del Ensayo

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca(gr/cm ³)	1,72	Densidad final seca(gr/cm ³)	1,72
Altura (cm)	38,60	Humedad Inicial (%)	2,7	Humedad final (%)	19,5
Gravedad de Sólidos	2,71	Saturación inicial (%)	12,6	Saturación final (%)	91,0

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,005	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,2	83,0	0,2	70,40	330,0	4,69	1,2E+00	23,0	1,1E+00
83,2	83,0	0,2	70,41	330,0	4,69	1,2E+00	23,0	1,1E+00
83,2	83,0	0,2	70,39	330,0	4,69	1,2E+00	23,0	1,1E+00
83,2	83,0	0,2	70,40	330,0	4,69	1,2E+00	23,0	1,1E+00
Promedio (cm/s) :								1,1E+00 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,010	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,4	83,0	0,4	70,44	795,0	11,29	1,5E+00	23,0	1,4E+00
83,4	83,0	0,4	70,47	795,0	11,28	1,5E+00	23,0	1,4E+00
83,4	83,0	0,4	70,46	795,0	11,28	1,5E+00	23,0	1,4E+00
83,4	83,0	0,4	70,46	795,0	11,28	1,5E+00	23,0	1,4E+00
Promedio (cm/s) :								1,4E+00 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,016	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
83,6	83,0	0,6	70,70	1250,0	17,68	1,5E+00	23,0	1,4E+00
83,6	83,0	0,6	70,35	1235,0	17,56	1,5E+00	23,0	1,4E+00
83,6	83,0	0,6	70,68	1250,0	17,69	1,5E+00	23,0	1,4E+00
83,6	83,0	0,6	75,35	1335,0	17,72	1,5E+00	23,0	1,4E+00
Promedio (cm/s) :								1,4E+00 (*)

- Notas:**
- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
 - 2) Material colocado con ligera compactación
 - 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-8	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.



Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.



Ensayo en proceso.

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **CD-9**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo Granular**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado por: **Elard Quispe**

Estado de la muestra

Colocada con ligera compactación

(*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	GC
------	-----------

Datos del Ensayo

Diámetro (cm)	30,20	Densidad inicial seca(gr/cm ³)	1,46	Densidad final seca(gr/cm ³)	1,46
Altura (cm)	39,80	Humedad Inicial (%)	5,8	Humedad final (%)	31,1
Gravedad de Sólidos	2,77	Saturación inicial (%)	17,9	Saturación final (%)	96,0

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,003	1 kPa					
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)	
85,6	85,5	0,1	70,51	165,0	2,34	1,3E+00	24,0	1,2E+00	
85,6	85,5	0,1	70,44	165,0	2,34	1,3E+00	24,0	1,2E+00	
85,6	85,5	0,1	70,44	165,0	2,34	1,3E+00	24,0	1,2E+00	
85,6	85,5	0,1	70,45	165,0	2,34	1,3E+00	24,0	1,2E+00	
Promedio (cm/s) :								1,2E+00	(*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,018	1 kPa					
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)	
86,2	85,5	0,7	70,47	520,0	7,38	5,9E-01	24,0	5,3E-01	
86,2	85,5	0,7	70,44	520,0	7,38	5,9E-01	24,0	5,3E-01	
86,2	85,5	0,7	70,45	520,0	7,38	5,9E-01	24,0	5,3E-01	
86,2	85,5	0,7	70,44	520,0	7,38	5,9E-01	24,0	5,3E-01	
Promedio (cm/s) :								5,3E-01	(*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad
Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,035	1 kPa					
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)	
86,9	85,5	1,4	70,47	1170,0	16,60	6,6E-01	24,0	6,0E-01	
86,9	85,5	1,4	70,44	1170,0	16,61	6,6E-01	24,0	6,0E-01	
86,9	85,5	1,4	70,47	1170,0	16,60	6,6E-01	24,0	6,0E-01	
86,9	85,5	1,4	70,46	1170,0	16,61	6,6E-01	24,0	6,0E-01	
Promedio (cm/s) :								6,0E-01	(*)

- Notas:**
- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
 - 2) Material colocado con ligera compactación
 - 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante



Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:

BT

Ingresado por:

ZAS

Revisado por:

CSM

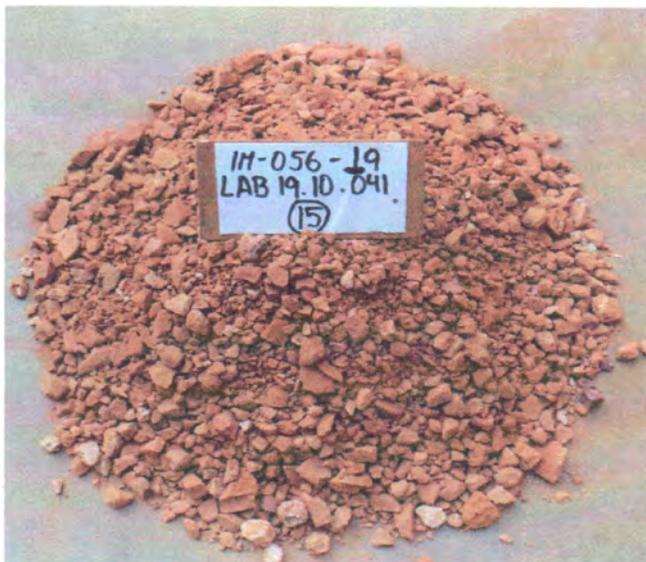
N° de informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-9	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.



Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.



Ensayo en proceso.

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **CD-3**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo granular**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado por: **Elard Quispe**

Estado de la muestra

Colocada con ligera compactación

(*) El promedio corresponde a 10 lecturas pero solo se reportan 4 de éstas.

SUCS	GP
------	----

Datos del Ensayo

Diámetro (cm)	30,60	Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,54	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,54
Altura (cm)	35,40	Humedad Inicial (%)	1,0	Humedad final (%)	19,8
Gravedad de Sólidos	2,65	Saturación inicial (%)	3,5	Saturación final (%)	73,0

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,004	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
85,7	85,5	0,2	70,43	425,0	6,03	1,9E+00	27,0	1,6E+00
85,7	85,5	0,2	70,44	430,0	6,10	2,0E+00	27,0	1,7E+00
85,7	85,5	0,2	70,49	430,0	6,10	2,0E+00	27,0	1,7E+00
85,7	85,5	0,2	70,50	430,0	6,10	2,0E+00	27,0	1,7E+00
Promedio (cm/s) :								1,7E+00 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,006	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
85,8	85,6	0,2	70,44	940,0	13,34	3,2E+00	27,0	2,7E+00
85,8	85,6	0,2	70,43	940,0	13,35	3,2E+00	27,0	2,7E+00
85,8	85,6	0,2	70,47	940,0	13,34	3,2E+00	27,0	2,7E+00
85,8	85,6	0,2	70,45	940,0	13,34	3,2E+00	27,0	2,7E+00
Promedio (cm/s) :								2,7E+00 (*)

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Carga

Gradiente hidráulico promedio			0,008	1 kPa				
H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta\eta$ (cm)	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)	Caudal (cm ³ /s)	K T (cm/s)	Temp. (°C)	K T20°C (cm/s)
85,9	85,6	0,3	70,48	1370,0	19,44	3,1E+00	27,0	2,7E+00
85,9	85,6	0,3	70,49	1370,0	19,44	3,1E+00	27,0	2,7E+00
85,9	85,6	0,3	70,43	1370,0	19,45	3,1E+00	27,0	2,7E+00
85,9	85,6	0,3	70,45	1370,0	19,45	3,1E+00	27,0	2,7E+00
Promedio (cm/s) :								2,7E+00 (*)

Notas:

- 1) El ensayo se realizó en un permeámetro de pared rígida de 30.5 cm de diámetro. Ensayo de carga constante
- 2) Material colocado con ligera compactación
- 3) Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

BT

Ingresado por:

ZAS

Revisado por:

CSM

N° de informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	CD-3	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Panel Fotográfico



Muestras proporcionadas por el cliente.

Cuarteo de la muestra.



Muestra preparada para el ensayo.

Ensayo en proceso.

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Handwritten signature
Anndes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
BT	ZAS	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anndes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anndes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

ANEXO B.4: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE PARED FLEXIBLE

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **SBP-01**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**
Datos del Ensayo

 Estado de la muestra: **Remoldeada al 95% de la Max. Dens. Seca = 1,618g/cm³ w = 21,8 %**
 Clasificación SUCS: **CH**
 Confinamiento efectivo: **15 kPa**
Calculo del Parámetro B

Presión de Poros (kPa)	Presión de Celda (kPa)	B
188,4	196,1	0,95
197,4	205,6	

Diámetro Inicial (cm)	10,04	Diámetro Final (cm)	10,03
Altura Inicial (cm)	11,00	Altura Final (cm)	10,99
		Gravedad Especifica de Sólidos	2,60
Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,54	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,54
Humedad Inicial (%)	21,8	Humedad final (%)	31,50
Saturación inicial (%)	82	Saturación final (%)	99

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

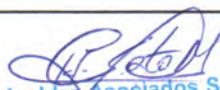
N°	Gradiente (Δh/l)	Tiempo (s)	Vol (V) (cm ³)	Caudal (Q) (cm ³ /s)	Perm. (K _T) (cm/s)	T °C	KT20°C (cm/s)
1	9,80	202,0	0,20	9,9E-04	1,3E-06	22,6	1,2E-06
2	9,62	572,0	0,20	3,5E-04	4,6E-07	22,6	4,3E-07
3	9,43	622,0	0,20	3,2E-04	4,3E-07	22,6	4,0E-07
4	9,25	775,0	0,20	2,6E-04	3,5E-07	22,6	3,3E-07
5	9,07	747,0	0,20	2,7E-04	3,7E-07	22,6	3,5E-07
6	8,89	742,0	0,20	2,7E-04	3,8E-07	22,6	3,6E-07
7	8,71	788,0	0,20	2,5E-04	3,7E-07	22,6	3,5E-07
8	8,52	794,0	0,20	2,5E-04	3,7E-07	22,6	3,5E-07
9	8,34	918,0	0,20	2,2E-04	3,3E-07	22,6	3,1E-07
Promedio							4,5E-07

Resolución de la bureta de medición 0,02 cc

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Ensayo a carga constante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

LS

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Cód. de Muestra:	SBP-02	Nº de Muestra:	--
Profundidad (m):	--	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe		

Datos del Ensayo	
Estado de la muestra:	Remoldeada al 95% de la Max. Dens. Seca = 1,993g/cm ³ y O.C.H. = 12,4 %
Clasificación SUCS:	CL
Confinamiento efectivo:	15 kPa

Calculo del Parámetro B			
Presión de Poros (kPa)	Presión de Celda (kPa)	B	
189,1	195,3	0,96	
195,3	201,8		

Diámetro Inicial (cm)	10,04	Diámetro Final (cm)	10,02
Altura Inicial (cm)	11,00	Altura Final (cm)	10,98
		Gravedad Especifica de Sólidos	2,62
Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,89	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,90
Humedad Inicial (%)	12,5	Humedad final (%)	17,1
Saturación inicial (%)	85	Saturación final (%)	99

Medición del Coeficiente de Permeabilidad							
Nº	Gradiente (Δh/l)	Tiempo (s)	Vol (V) (cm ³)	Caudal (Q) (cm ³ /s)	Perm. (K _T) (cm/s)	T °C	KT20°C (cm/s)
1	4,36	7,4	0,20	2,70E-02	4,99E-05	23	4,69E-05
2	4,18	26,2	0,20	7,63E-03	1,44E-05	23	1,35E-05
3	4,00	30,6	0,20	6,54E-03	1,26E-05	23	1,18E-05
4	3,82	33,6	0,20	5,95E-03	1,17E-05	23	1,10E-05
5	3,64	35,4	0,20	5,65E-03	1,13E-05	23	1,07E-05
6	3,45	37,3	0,20	5,36E-03	1,10E-05	23	1,03E-05
7	3,27	41,1	0,20	4,87E-03	1,02E-05	23	9,61E-06
8	3,09	48,9	0,20	4,09E-03	8,79E-06	23	8,26E-06
9	2,91	36,9	0,20	5,42E-03	1,19E-05	23	1,12E-05
Promedio							1,5E-05

Resolución de la bureta de medición 0,02 cc

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.
 Ensayo a carga constante.


 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de informe:
LS	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **SBP-03**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

Datos del Ensayo	
Estado de la muestra:	Remoldeada al 95% de la Max. Dens. Seca = 1,888g/cm³ y O.C.H. = 14,1 %
Clasificación SUCS:	SC
Confinamiento efectivo:	15 kPa

Calculo del Parámetro B			
Presión de Poros (kPa)	Presión de Celda (kPa)	B	
182,2	195,0	0,98	
189,1	202,1		

Diámetro Inicial (cm)	10,04	Diámetro Final (cm)	9,99
Altura Inicial (cm)	11,00	Altura Final (cm)	10,97
		Gravedad Específica de Sólidos	2,74
Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,79	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,82
Humedad Inicial (%)	14,1	Humedad final (%)	21,4
Saturación inicial (%)	73	Saturación final (%)	99

Medición del Coeficiente de Permeabilidad							
N°	Gradiente (Δh/l)	Tiempo (s)	Vol (V) (cm ³)	Caudal (Q) (cm ³ /s)	Perm. (K _T) (cm/s)	T °C	KT20°C (cm/s)
1	4,36	61,0	0,20	3,28E-03	6,05E-06	23	5,65E-06
2	4,18	90,0	0,20	2,22E-03	4,19E-06	23	3,91E-06
3	4,00	74,0	0,20	2,70E-03	5,20E-06	23	4,85E-06
4	3,82	87,0	0,20	2,30E-03	4,52E-06	23	4,22E-06
5	3,64	91,0	0,20	2,20E-03	4,41E-06	23	4,12E-06
6	3,45	87,0	0,20	2,30E-03	4,72E-06	23	4,40E-06
7	3,27	98,0	0,20	2,04E-03	4,29E-06	23	4,00E-06
8	3,09	105,0	0,20	1,90E-03	4,09E-06	23	3,82E-06
9	2,91	102,0	0,20	1,96E-03	4,32E-06	23	4,03E-06
Promedio							4,3E-06

Resolución de la bureta de medición 0,02 cc

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Ensayo a carga constante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

 Realizado por: **LS** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

 Cód. de Muestra: **SBP-04**

N° de Muestra: --

Profundidad (m): --

N° de Proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado Por: **Elard Quispe**
Datos del Ensayo

 Estado de la muestra: **Remoldeada al 95% de la Max. Dens. Seca = 1,797g/cm³ y O.C.H. = 17,1 %**
 Clasificación SUCS: **CL**
 Confinamiento efectivo: **15 kPa**
Calculo del Parámetro B

Presión de Poros (kPa)	Presión de Celda (kPa)	B
189,1	194,6	0,96
196,7	202,6	

Diámetro Inicial (cm)	10,04	Diámetro Final (cm)	10,01
Altura Inicial (cm)	11,00	Altura Final (cm)	10,97
		Gravedad Especifica de Sólidos	2,68
Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,71	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,72
Humedad Inicial (%)	17,1	Humedad final (%)	20,4
Saturación inicial (%)	80	Saturación final (%)	98

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

N°	Gradiente (Δh/l)	Tiempo (s)	Vol (V) (cm ³)	Caudal (Q) (cm ³ /s)	Perm. (K _T) (cm/s)	T °C	KT20°C (cm/s)
1	4,36	33,0	0,20	6,06E-03	1,12E-05	23	1,04E-05
2	4,18	53,0	0,20	3,77E-03	7,11E-06	23	6,63E-06
3	4,00	56,0	0,20	3,57E-03	6,87E-06	23	6,41E-06
4	3,82	57,0	0,20	3,51E-03	6,89E-06	23	6,43E-06
5	3,64	65,0	0,20	3,08E-03	6,18E-06	23	5,77E-06
6	3,45	68,0	0,20	2,94E-03	6,04E-06	23	5,64E-06
7	3,27	81,0	0,20	2,47E-03	5,19E-06	23	4,84E-06
8	3,09	79,0	0,20	2,53E-03	5,44E-06	23	5,08E-06
9	2,91	83,0	0,20	2,41E-03	5,30E-06	23	4,95E-06
Promedio							6,2E-06

Resolución de la bureta de medición 0,02 cc

Observación:

 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.
 Ensayo a carga constante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

LS

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del proyecto: -

 Cód. de muestra: **SBP-06**

N° de muestra: ---

Profundidad (m): ---

N° de proyecto: -

Zona: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

 Fecha: **18/09/2019**

 Solicitado por: **Elard Quispe**
Datos del Ensayo

 Estado de la muestra: **Remoldeada al 95% de la Max. Dens. Seca = 1,755g/cm³ y O.C.H. = 17,5 %**
 Clasificación SUCS: **CL**
 Confinamiento efectivo: **15 kPa**
Calculo del Parámetro B

Presión de Poros (kPa)	Presión de Celda (kPa)	B
182,9	194,9	0,97
189,8	202,0	

Diámetro Inicial (cm)	10,04	Diámetro Final (cm)	10,02
Altura Inicial (cm)	11,00	Altura Final (cm)	10,99
		Gravedad Especifica de Sólidos	2,64
Densidad inicial seca (gr/cm ³)	1,67	Densidad final seca (gr/cm ³)	1,68
Humedad Inicial (%)	17,6	Humedad final (%)	25,0
Saturación inicial (%)	80	Saturación final (%)	99

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

N°	Gradiente (Δh/l)	Tiempo (s)	Vol (V) (cm ³)	Caudal (Q) (cm ³ /s)	Perm. (K _r) (cm/s)	T °C	KT20°C (cm/s)
1	4,36	63,0	0,20	3,17E-03	5,86E-06	23	5,47E-06
2	4,18	184,0	0,20	1,09E-03	2,05E-06	23	1,91E-06
3	4,00	217,0	0,20	9,22E-04	1,77E-06	23	1,65E-06
4	3,82	230,0	0,20	8,70E-04	1,71E-06	23	1,59E-06
5	3,64	207,0	0,20	9,66E-04	1,94E-06	23	1,81E-06
6	3,45	276,0	0,20	7,25E-04	1,49E-06	23	1,39E-06
7	3,27	248,0	0,20	8,06E-04	1,69E-06	23	1,58E-06
8	3,09	226,0	0,20	8,85E-04	1,90E-06	23	1,78E-06
9	2,91	296,0	0,20	6,76E-04	1,49E-06	23	1,39E-06
Promedio							2,1E-06

Resolución de la bureta de medición 0,02 cc

Observación:

 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.
 Ensayo a carga constante.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

 Realizado por: **LS** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

**ANEXO C: ENSAYOS DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA EN
INTERFASES CON GEOSINTÉTICOS**

ANEXO C.1: INTERFASE GM-SG

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-1 Suelo Granular

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

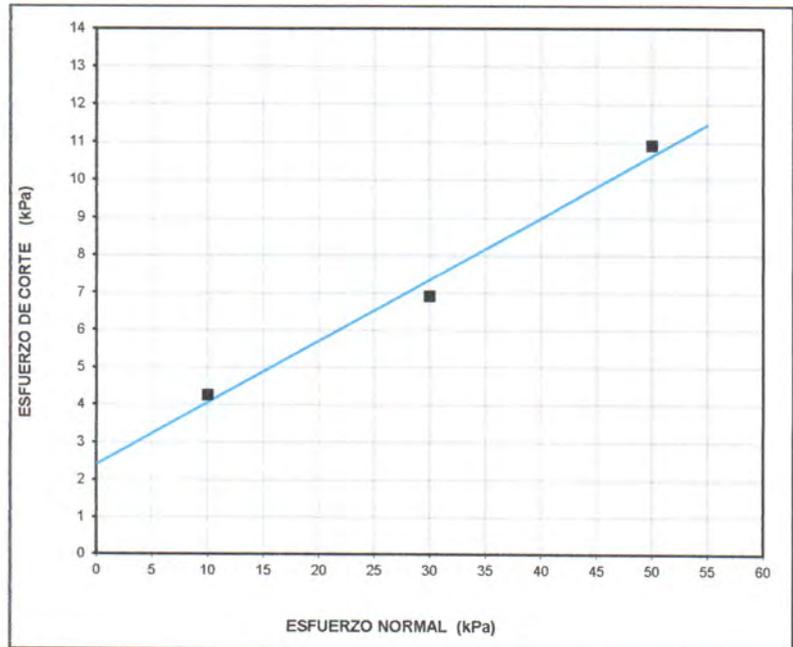
(Valores Pico)

N° Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	4,3	23
2	30,0	6,9	13
3	50,0	10,9	12

Adhesión: 2,42 kPa

Ang. Fricción: 9,4 grados

Coeficiente de Fricción: 0,16

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

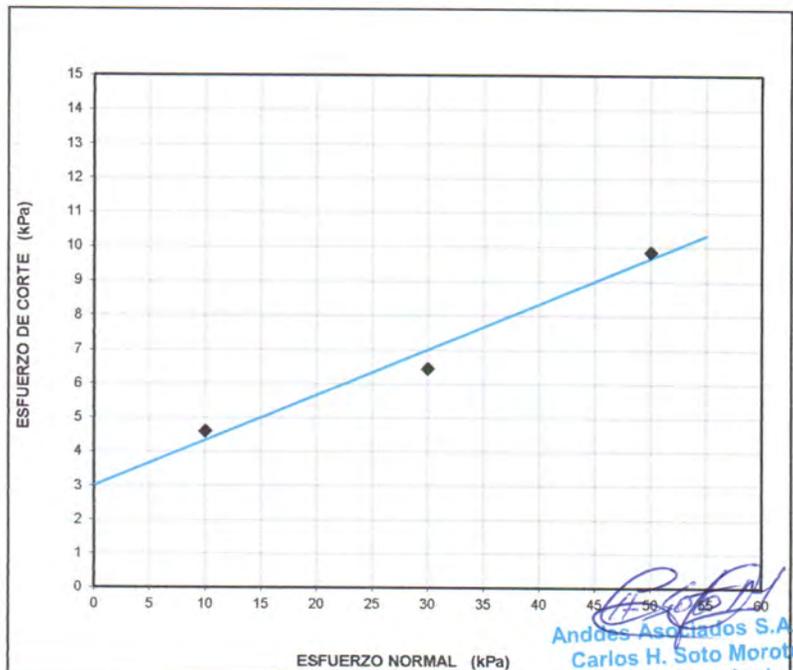
(7.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	4,6	25
2	30,0	6,5	12
3	50,0	9,9	11

Adhesion: 3,03 kPa

Ang. Fricción: 7,6 grados

Coeficiente of Fricción: 0,13

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP-87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

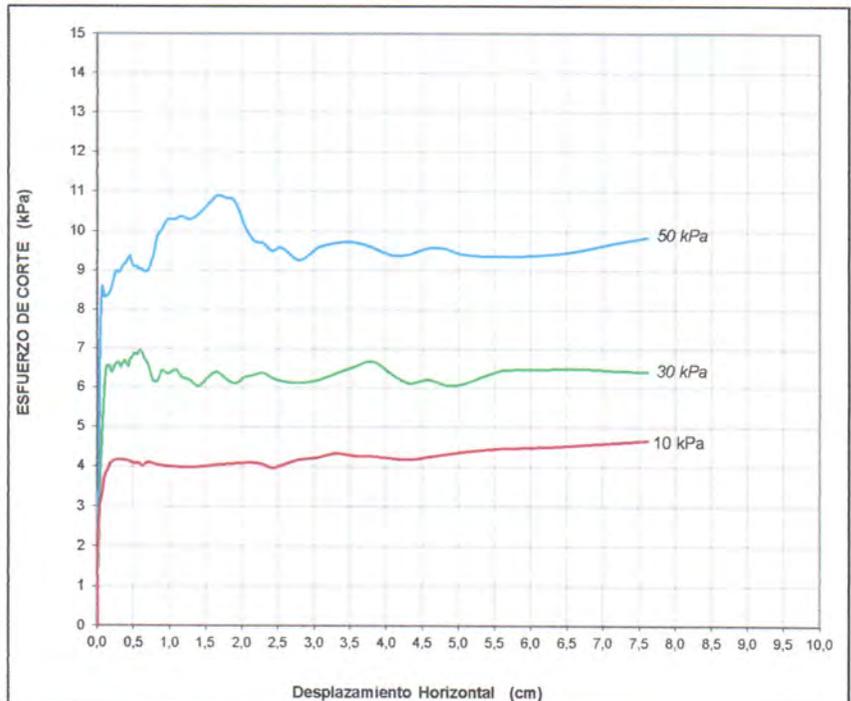
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -
Ubicación del Proyecto: -

Zona: -	Profundidad (m): ---
Descripción: Suelo Granular	Nº de Proyecto: -
Solicitado Por: Elard Quispe	Nº de Informe: LAB-19.10.041
Superstrate: ← Capa de Drenaje	Fecha: 18/09/2019
Material 1: ← CD-1 Suelo Granular	LSN: Fijado
Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)	
Substrato: → Substrato Rígido	

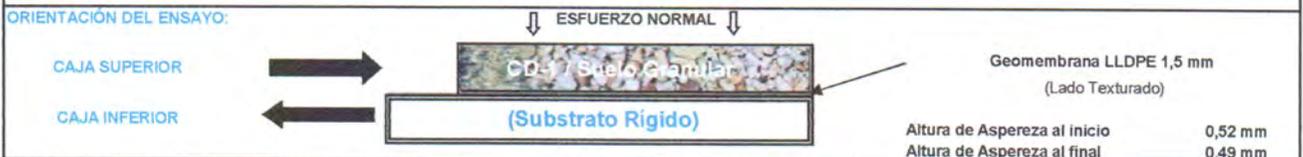
DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-1 Suelo Granular	
Clasificación SUCS SP	
Contenido de Humedad Inicial (%) 2,00%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,337 gr/cm³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 4,4%	2) 3,7% 3) 3,4%



CONDICIONES ESTÁNDAR : **VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min**

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada especimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-1 Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
3. Cada especimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP Ingresado por: JCA Revisado por: CSM Nº de Informe: LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-1 Suelo Granular		
Material 2:	→ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

(Signature)
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

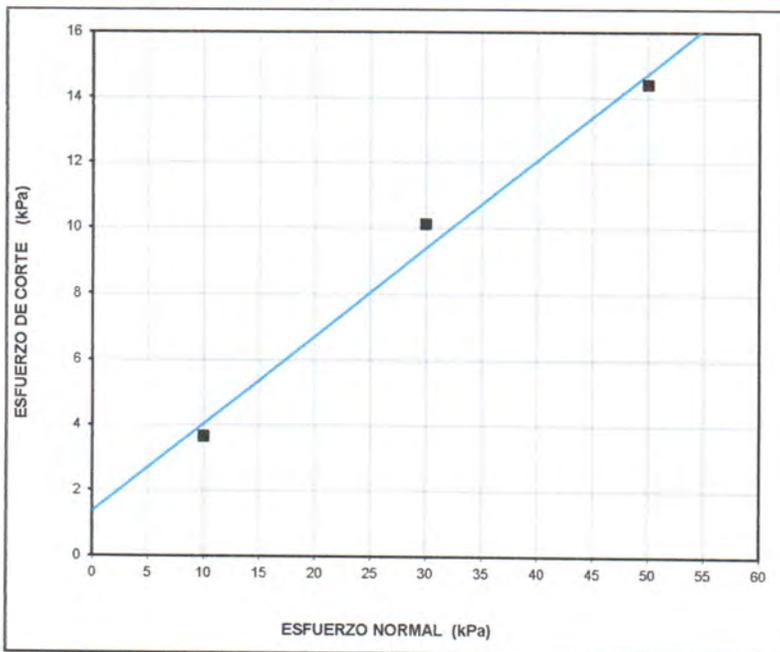
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

 Cliente: -
 Ubicación del Proyecto: -
 Zona: - Profundidad (m): ---
 Descripción: **Suelo Granular** N° de Proyecto: -
 Solicitado Por: **Elard Quispe** N° de Informe: **LAB-19.10.041**
 Superstrate: ← Capa de Drenaje Fecha: **18/09/2019**
 Material 1: ← CD-1 Suelo Granular LSN: Fijado
 Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)
 Substrato: → Substrato Rígido

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (Valores Pico)			
N° Ensayo	Esf. Normal kPa	Esf. De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	3,7	20
2	30,0	10,1	19
3	50,0	14,4	16

Adhesión: 1,38 kPa
 Ang. Fricción: 15,0 grados
 Coeficiente de Fricción: 0,26

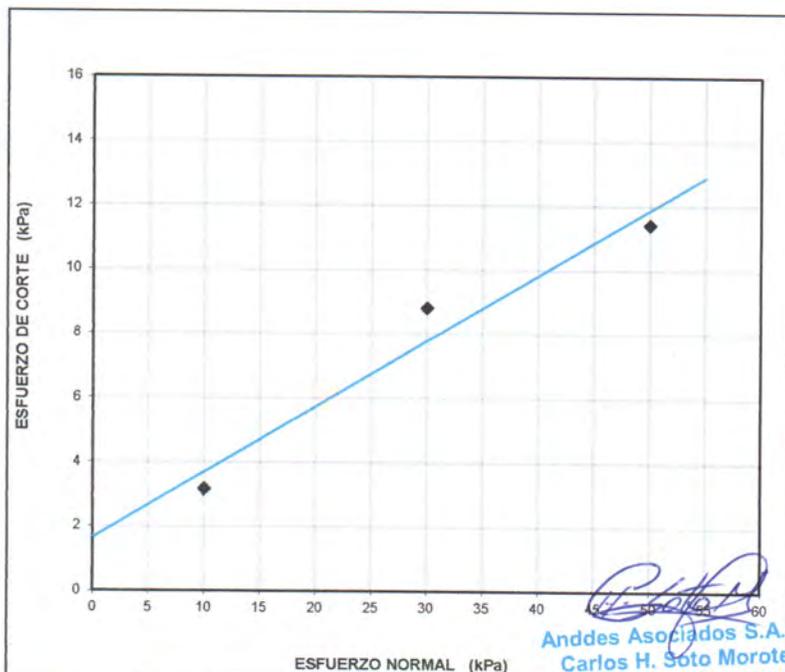
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal kPa	Esf. De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	3,2	17
2	30,0	8,8	16
3	50,0	11,4	13

Adhesión: 1,65 kPa
 Ang. Fricción: 11,6 grados
 Coeficiente of Fricción: 0,20

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

 Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-1 Suelo Granular

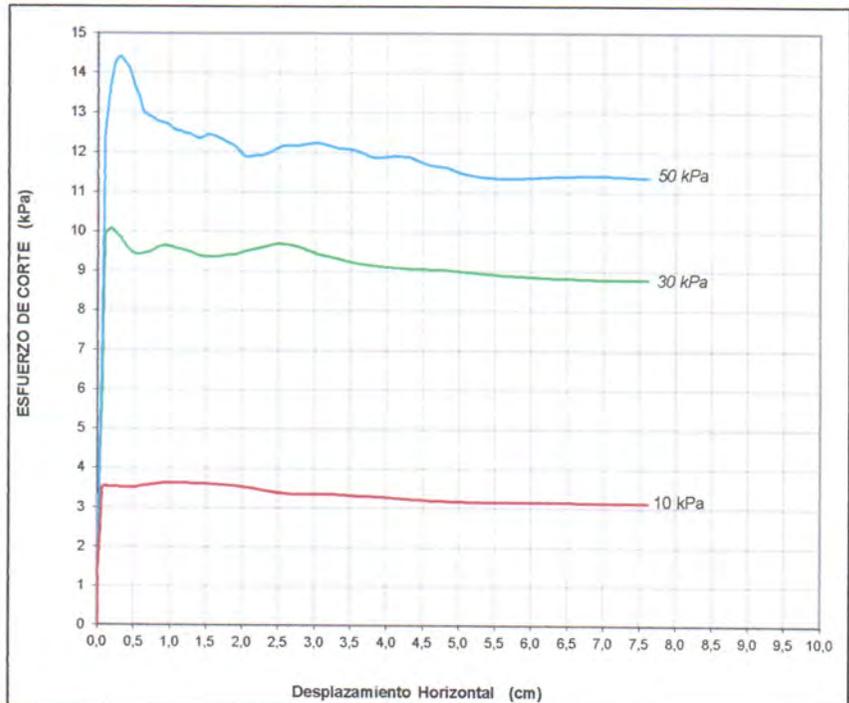
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-1 Suelo Granular	
Clasificación SUCS SP	
Contenido de Humedad Inicial (%) 2,00%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,337 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 13,3%	2) 10,8% 3) 9,9%



CONDICIONES ESTÁNDAR :

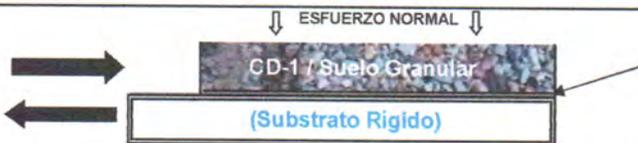
VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones.
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:

CAJA SUPERIOR

CAJA INFERIOR



Geomembrana LLDPE 1,5 mm
(Lado Texturado)

Altura de Aspereza al inicio: 0,50 mm
Altura de Aspereza al final: 0,48 mm

NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-1 Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remodelado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: **Capa de Drenaje**

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: **CD-1 Suelo Granular**

LSN: **Fijado**

Material 2: **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

Substrato: **Substrato Rígido**

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-2 - Suelo Granular

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

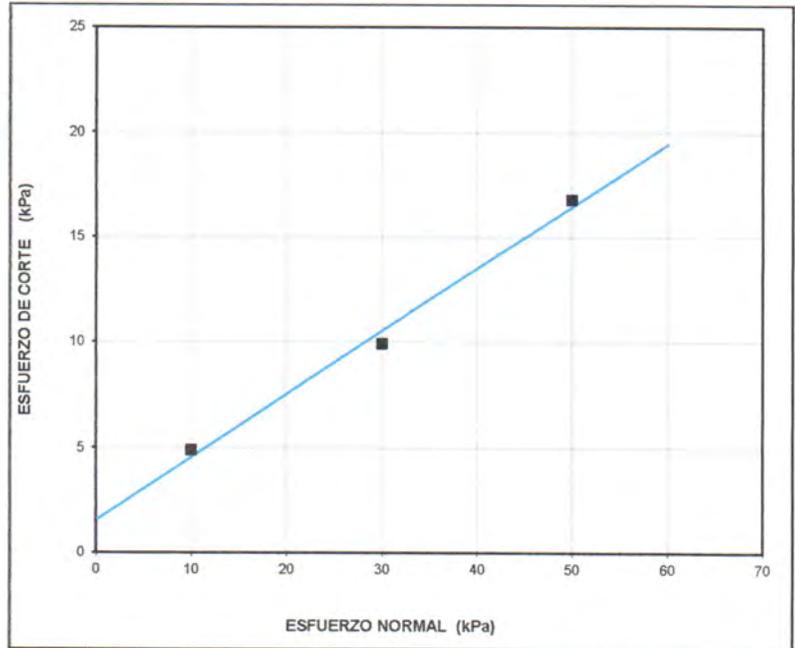
(2,5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf Normal kPa	Esf De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	4,9	26
2	30,0	9,9	18
3	50,0	16,8	19

Adhesión: 1,61 kPa

Ang. Fricción: 16,6 grados

Coeficiente de Fricción: 0,29

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

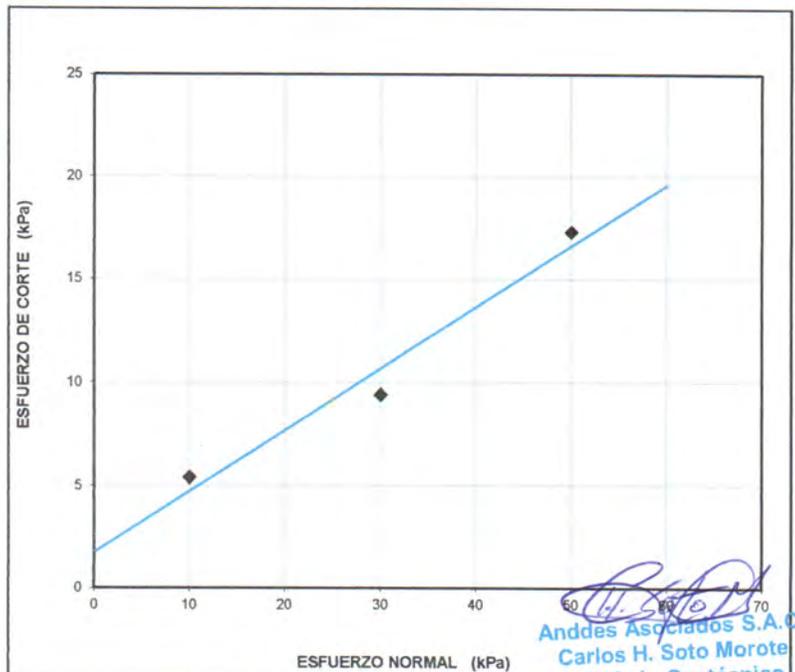
(7,5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf Normal kPa	Esf De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	5,4	28
2	30,0	9,4	17
3	50,0	17,3	19

Adhesión: 1,78 kPa

Ang. Fricción: 16,5 grados

Coeficiente of Fricción: 0,29

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-2 - Suelo Granular

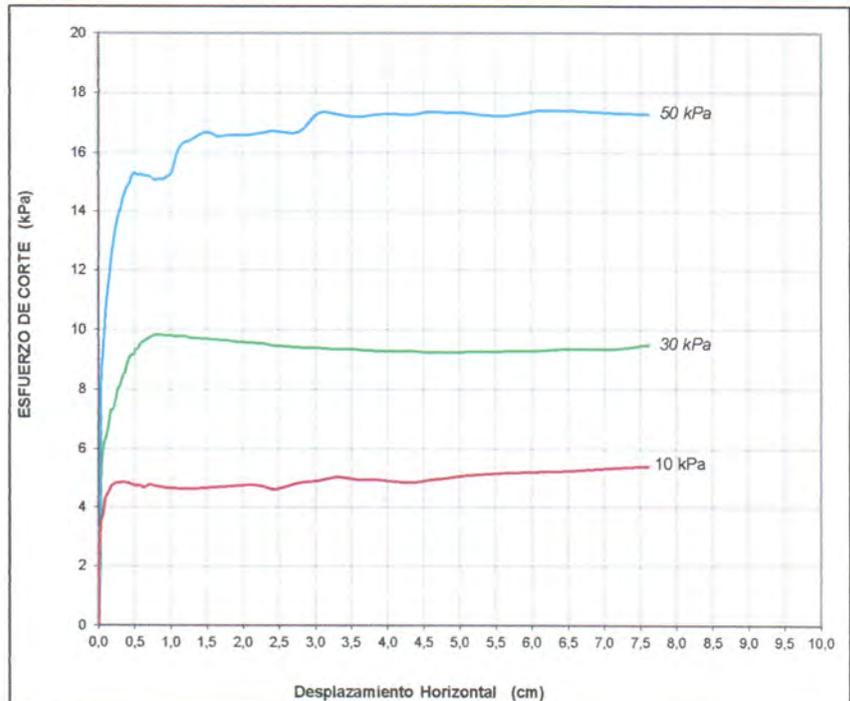
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

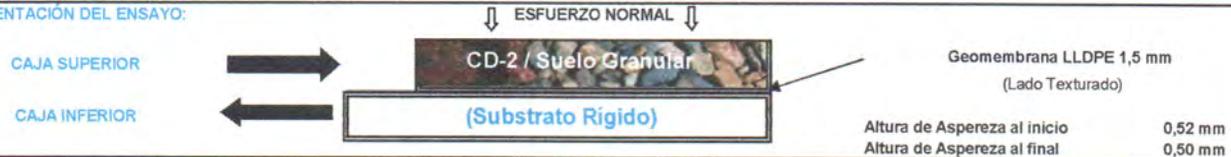
Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-2 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GP	
Contenido de Humedad Inicial(%) 1,90%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,039 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 2,2%	2) 2,1% 3) 1,9%


CONDICIONES ESTÁNDAR :
VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:

NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-2 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← **CD-2 - Suelo Granular**

LSN: Fijado

Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

Substrato: → **Substrato Rígido**

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

[Signature]
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

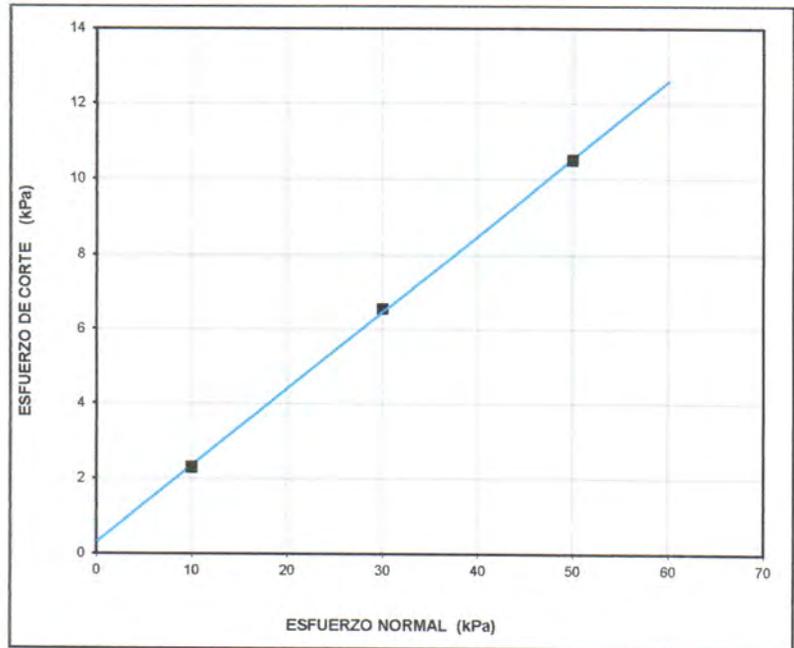
 Cliente: -
 Ubicación del Proyecto: -
 Zona: -
 Descripción: **Suelo Granular**
 Solicitado Por: **Elard Quispe**
 Superstrate: **Capa de Drenaje**
 Material 1: **CD-8 - Suelo Granular**
 Material 2: **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**
 Substrato: **Substrato Rígido**

 Profundidad (m): ---
 N° de Proyecto: -
 N° de Informe: **LAB-19.10.041**
 Fecha: **18/09/2019**
 LSN: Fijado

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Est. Normal	Esf. De Corte	Angulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,3	13
2	30,0	6,6	12
3	50,0	10,5	12

Adhesión: 0,32 kPa
 Ang. Fricción: 11,6 grados
 Coeficiente de Fricción: 0,20

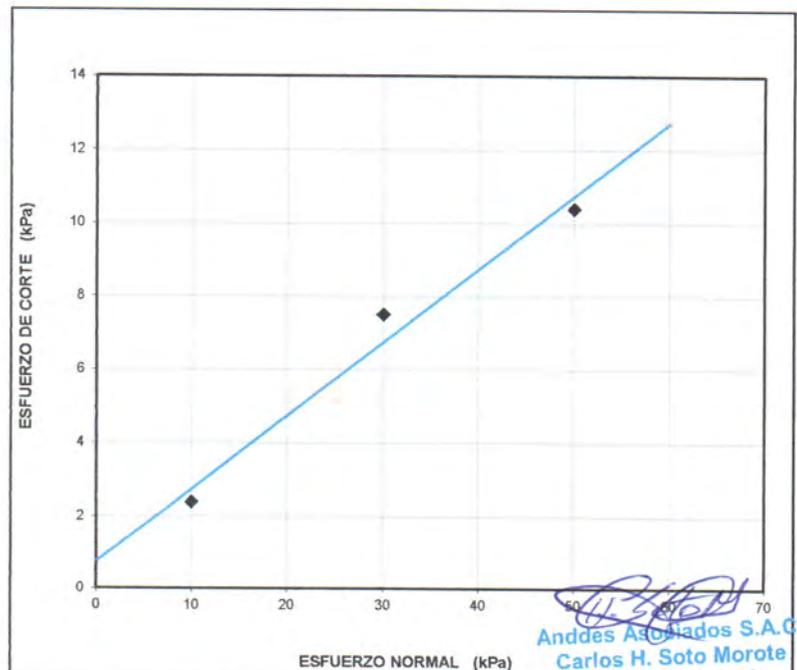
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Est. Normal	Esf. De Corte	Angulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,4	13
2	30,0	7,5	14
3	50,0	10,4	12

Adhesion: 0,77 kPa
 Ang. Fricción: 11,3 grados
 Coeficiente of Fricción: 0,20

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Signature
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 67545

 Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-8 - Suelo Granular

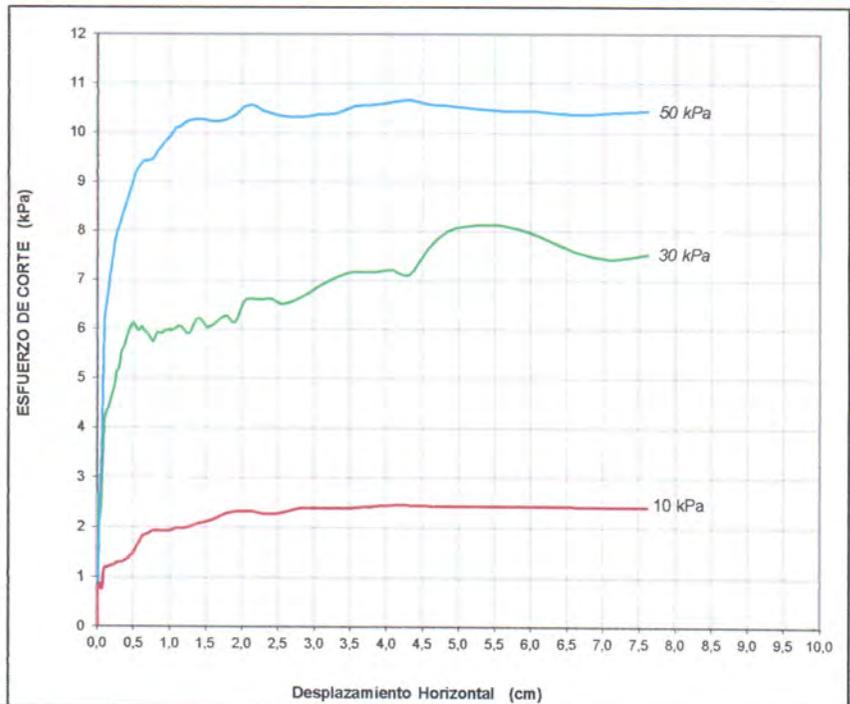
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-8 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GP-GC	
Contenido de Humedad Inicial(%) 1,50%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,626 gr/cm³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 13,3%	2) 12,4% 3) 11,9%

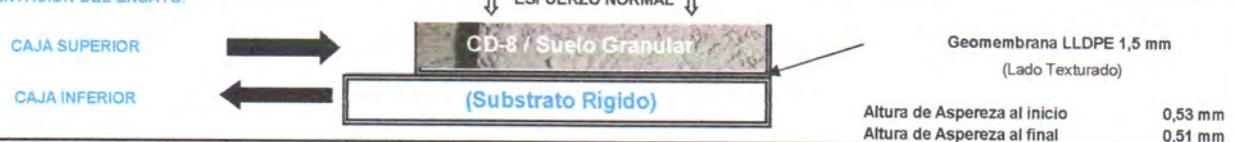


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada especimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-8 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
3. Cada especimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

(Firma)
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

Fecha: **18/09/2019**

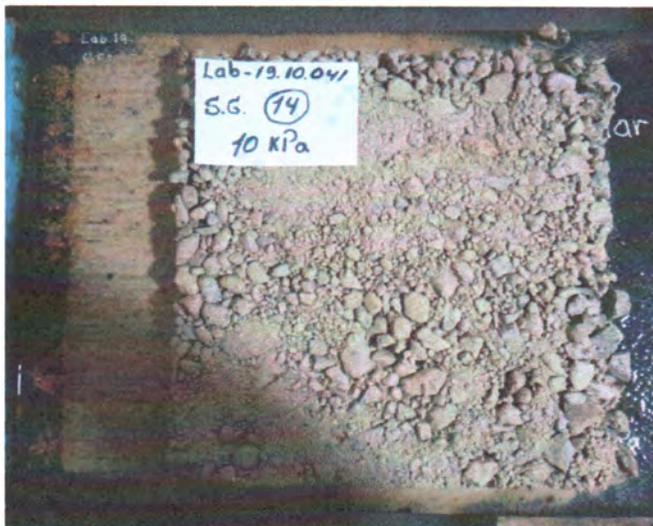
Material 1: ← **CD-8 - Suelo Granular**

LSN: Fijado

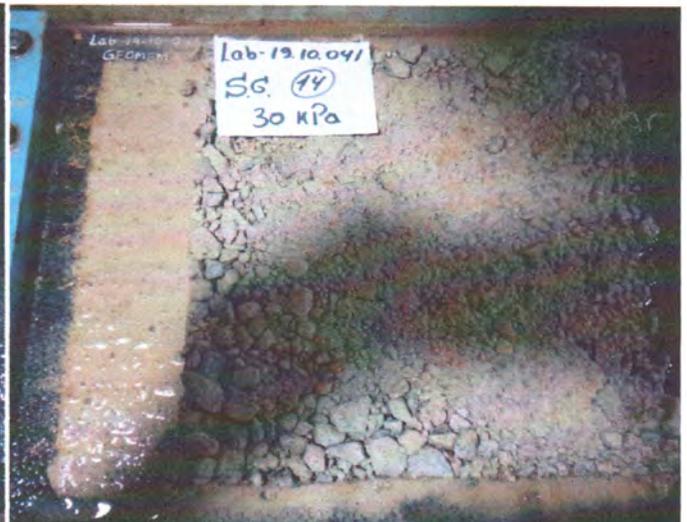
Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

Substrato: → **Substrato Rígido**

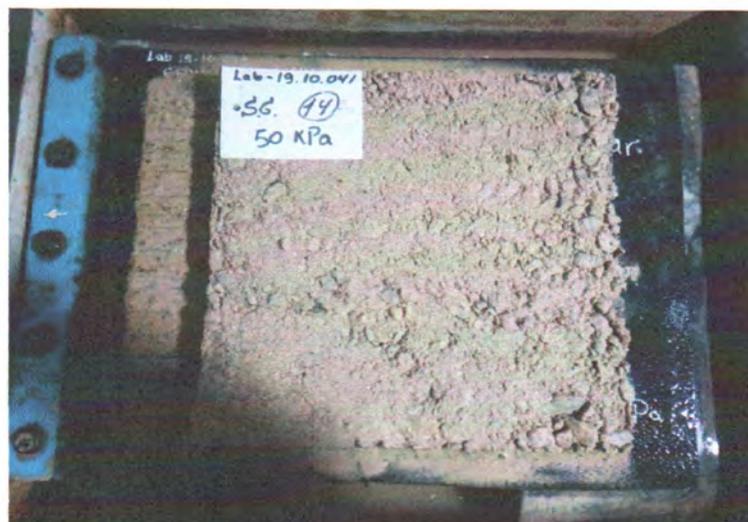
Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

(Signature)
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-8 - Suelo Granular

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

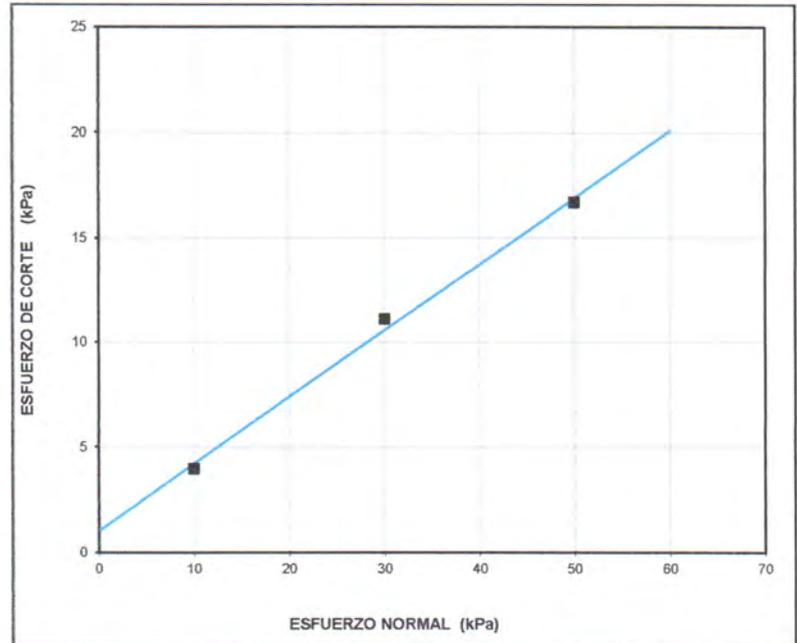
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS			
(Valores Pico)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	4,0	22
2	30,0	11,1	20
3	50,0	16,7	18

Adhesión: 1,08 kPa

Ang. Fricción: 17,6 grados

Coefficiente de Fricción: 0,31

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



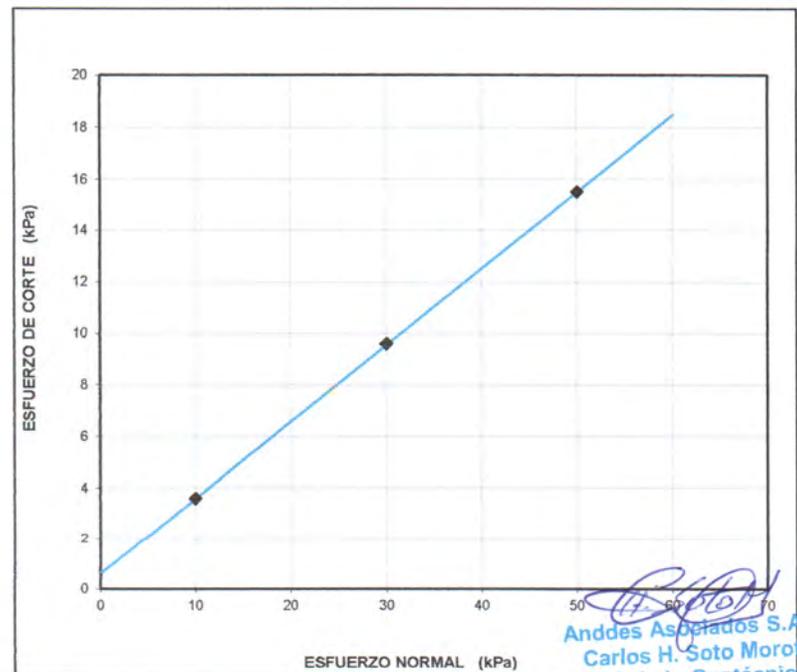
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS			
(7,5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	3,6	20
2	30,0	9,6	18
3	50,0	15,5	17

Adhesión: 0,64 kPa

Ang. Fricción: 16,6 grados

Coefficiente of Fricción: 0,29

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Carlos H. Soto Morote
 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

 Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-8 - Suelo Granular

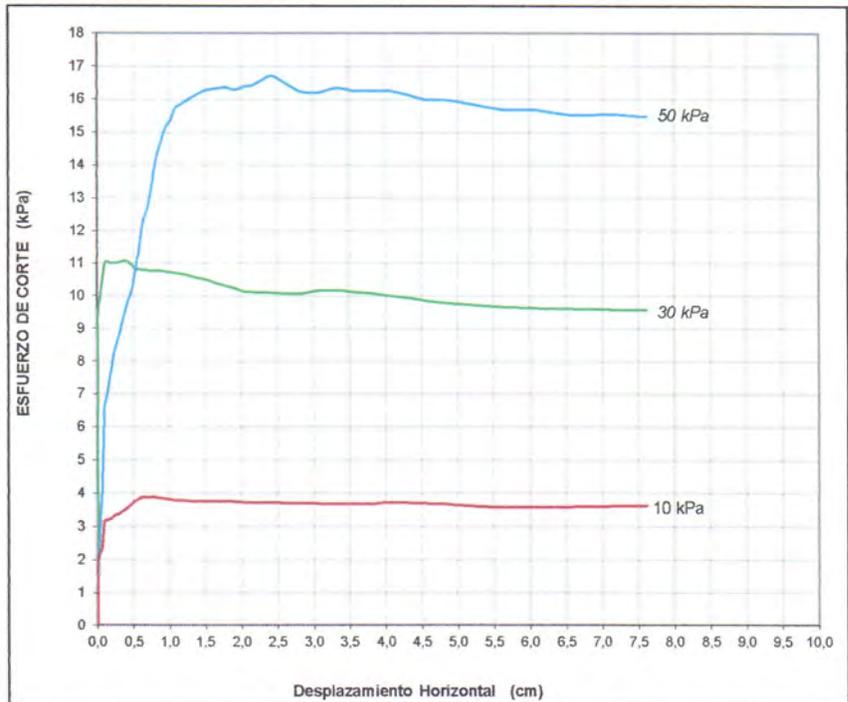
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-8 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GP-GC	
Contenido de Humedad Inicial(%) 1,50%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,626 gr/cm³	
Cont. Humedad Final (%) 1) 15,8% 2) 14,6% 3) 13,8%	

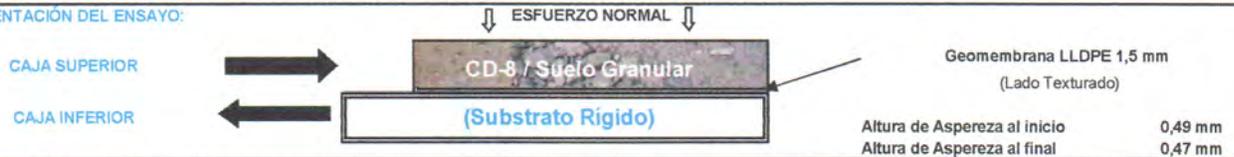


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-8 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anndes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

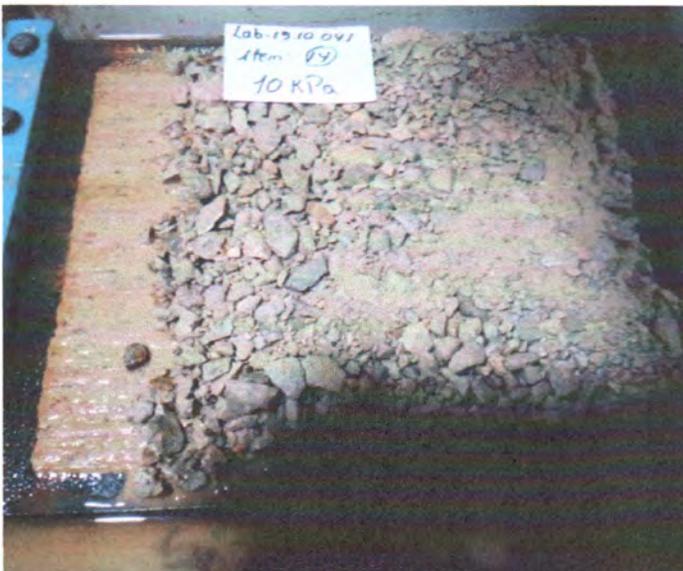
Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anndes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anndes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-8 - Suelo Granular		
Material 2:	→ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Handwritten Signature
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate:  **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1:  **CD-9 - Suelo Granular**

LSN: Fijado

 Material 2:  **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

 Substrato:  **Substrato Rígido**
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

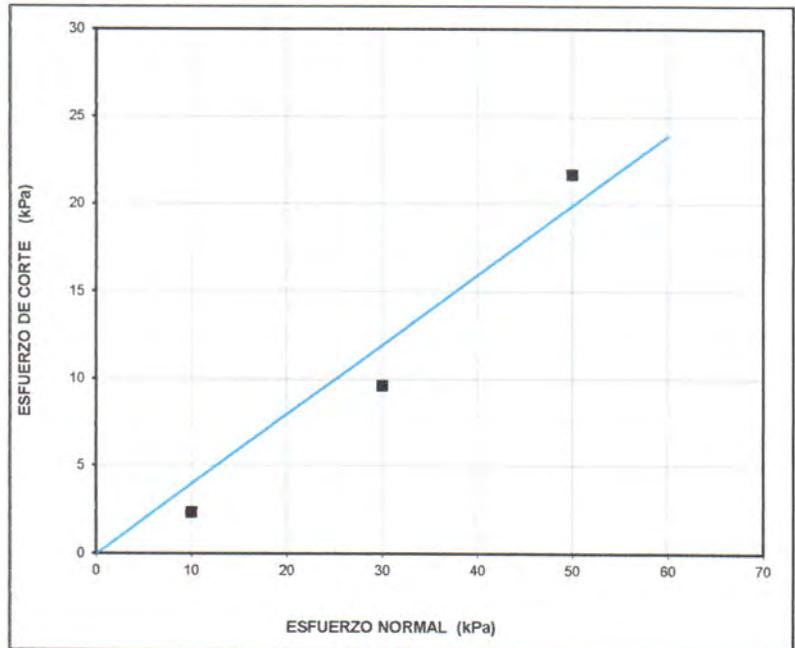
(2.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,3	13
2	30,0	9,6	18
3	50,0	21,7	23

Adhesión: 0,00 kPa

Ang. Fricción: 21,7 grados

Coeficiente de Fricción: 0,38

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

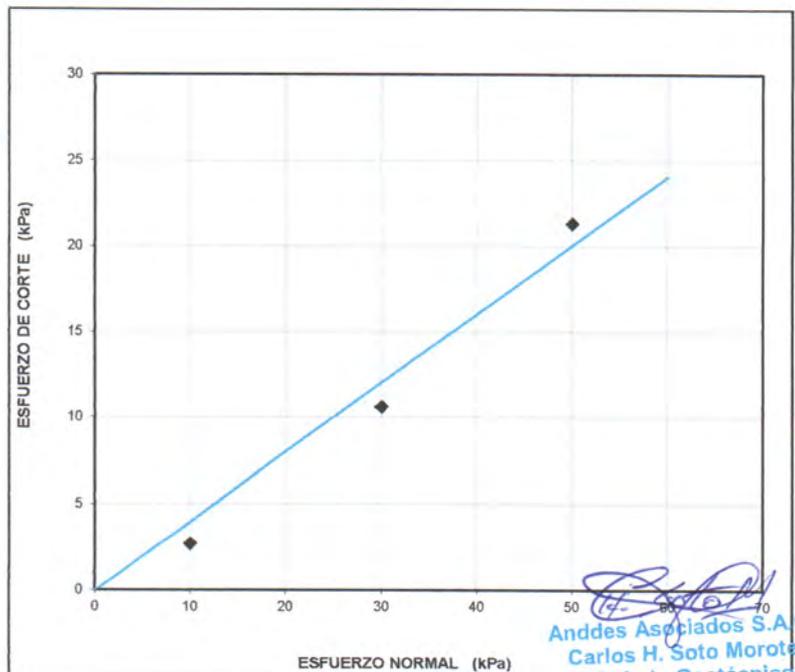
(7.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,7	15
2	30,0	10,6	19
3	50,0	21,3	23

Adhesión: 0,00 kPa

Ang. Fricción: 21,9 grados

Coeficiente of Fricción: 0,38

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-9 - Suelo Granular

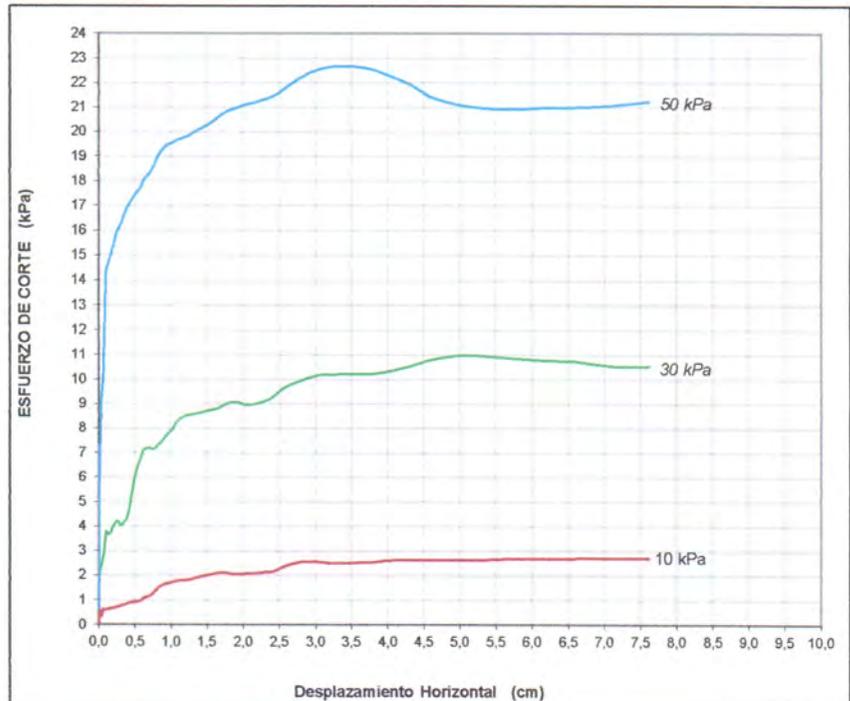
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-9 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GC	
Contenido de Humedad Inicial(%) 1,75%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,473 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 20,5%	2) 19,5% 3) 18,6%

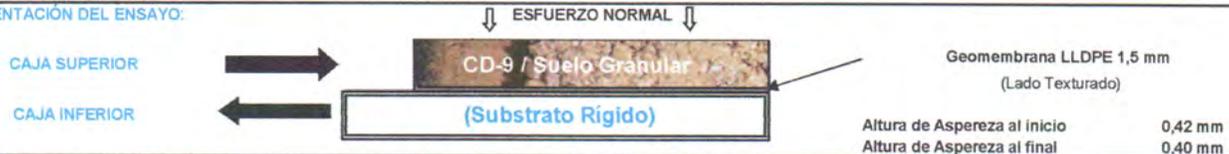


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-9 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-9 - Suelo Granular		
Material 2:	⇒ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate:  **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1:  **CD-9 - Suelo Granular**

LSN: Fijado

 Material 2:  **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

 Substrato:  **Substrato Rígido**

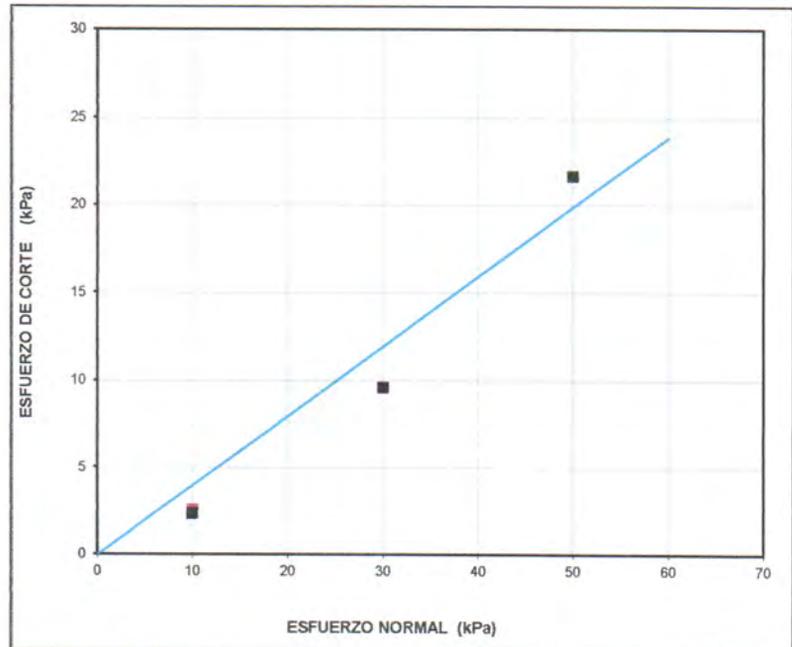
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,3	13
2	30,0	9,6	18
3	50,0	21,7	23
1	10,0	2,6	14

Adhesión: 0,00 kPa

Ang. Fricción: 21,7 grados

Coefficiente de Fricción: 0,38

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



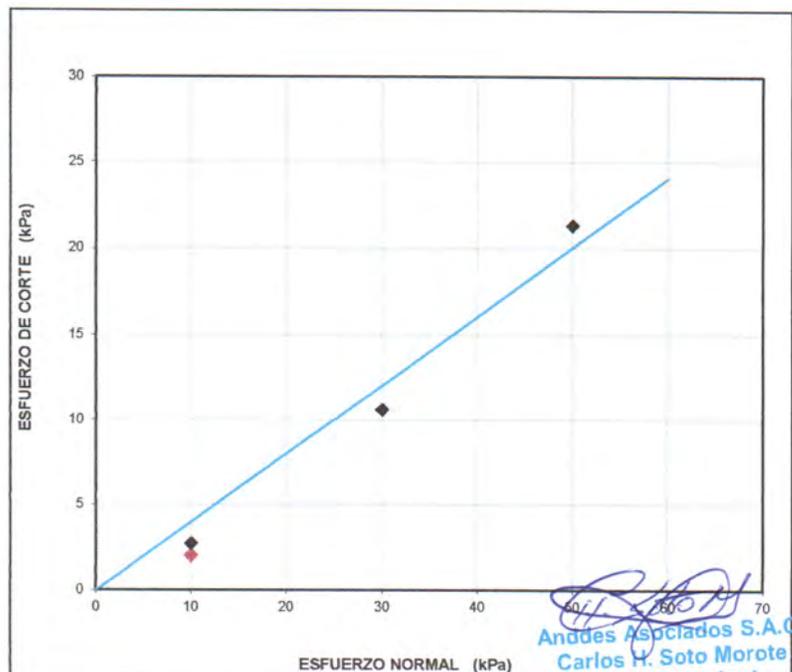
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,7	15
2	30,0	10,6	19
3	50,0	21,3	23
1	10,0	2,0	11

Adhesión: 0,00 kPa

Ang. Fricción: 21,9 grados

Coefficiente of Fricción: 0,38

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-9 - Suelo Granular

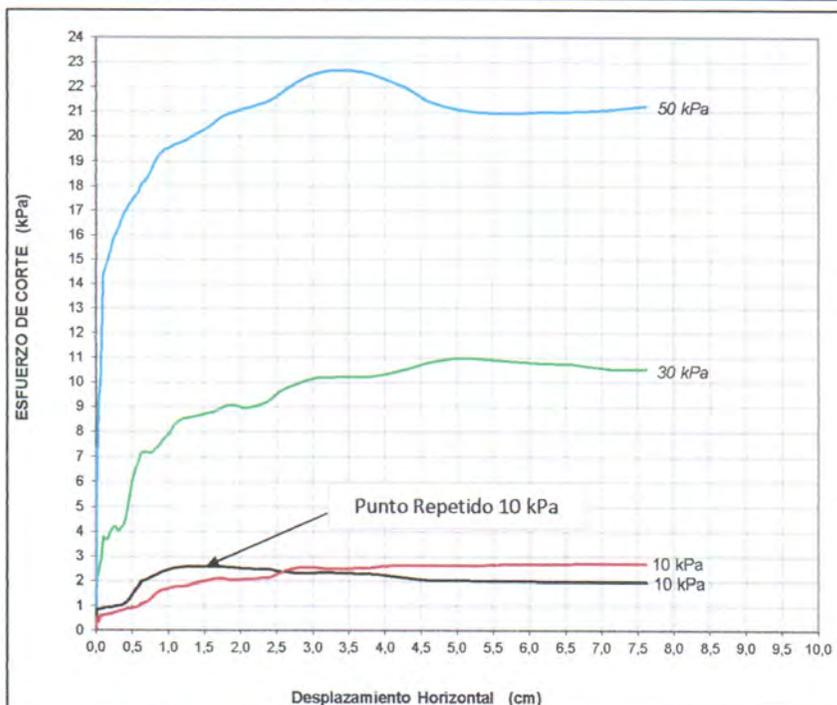
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-9 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS	
GC	
Contenido de Humedad Inicial (%)	
1,75%	
Densidad Seca Inicial	
DS = 1,473 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 20,5%	2) 19,5%
	3) 18,6%

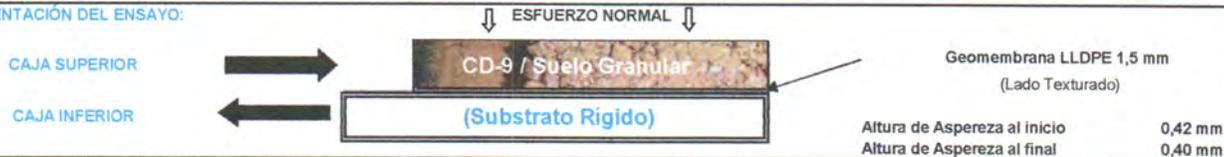


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-9 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos B. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos B. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

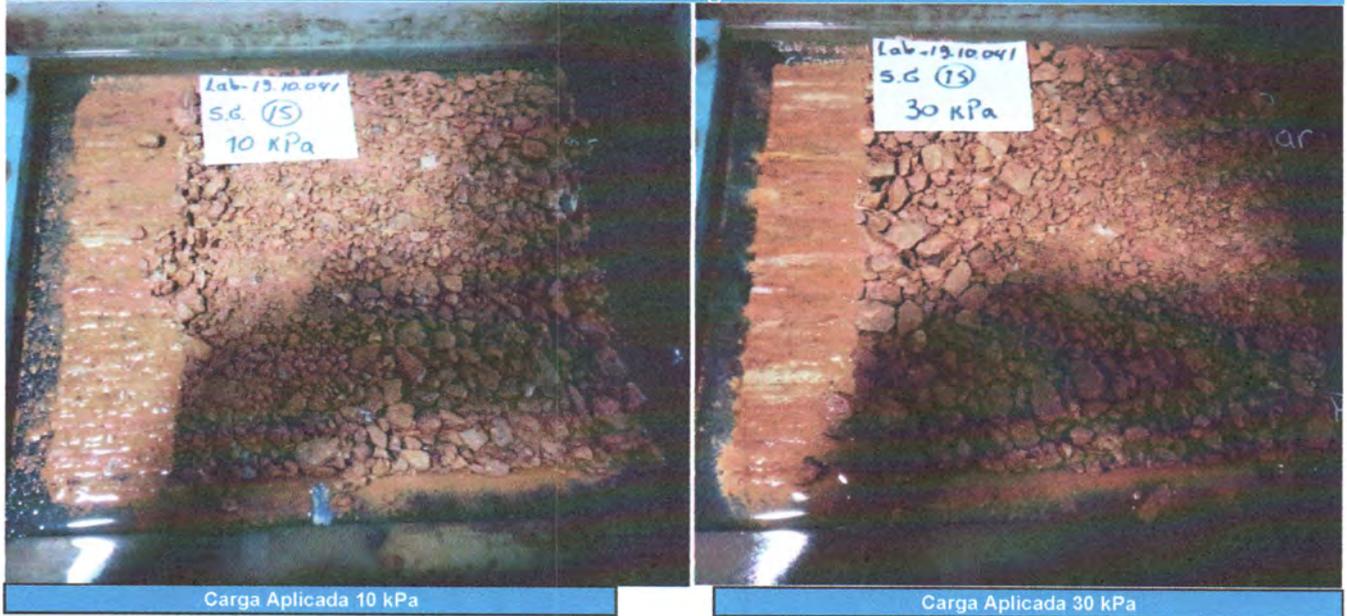
LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-9 - Suelo Granular		
Material 2:	→ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Carga Aplicada 50 kPa

Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

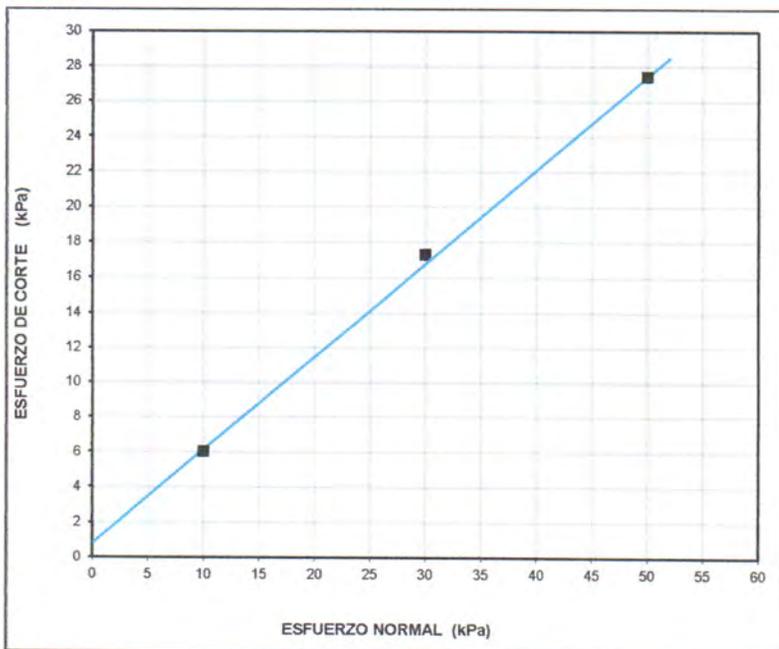
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

 Cliente: -
 Ubicación del Proyecto: -
 Zona: -
 Descripción: **Suelo Granular**
 Solicitado Por: **Elard Quispe**
 Superstrate: Capa de Drenaje
 Material 1: CD-3
 Material 2: Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)
 Substrato: Substrato Rígido
 Profundidad (m): ---
 N° de Proyecto: -
 N° de Informe: **LAB-19.10.041**
 Fecha: **18/09/2019**
 LSN: Fijado

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (Valores Pico)			
N° Ensayo	Esf. Normal kPa	Esf. De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	6,0	31
2	30,0	17,3	30
3	50,0	27,4	29

Adhesión: 0,85 kPa
 Ang. Fricción: 28,0 grados
 Coeficiente de Fricción: 0,49

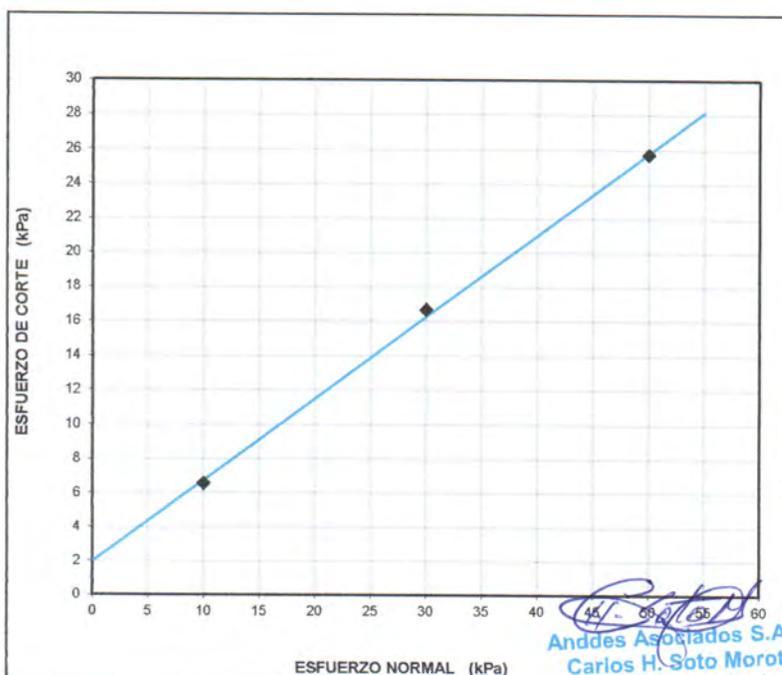
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal kPa	Esf. De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	6,6	33
2	30,0	16,7	29
3	50,0	25,7	27

Adhesión: 2,01 kPa
 Ang. Fricción: 25,5 grados
 Coeficiente of Fricción: 0,44

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



[Firma]
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnica
 CIP: 87545

 Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-3

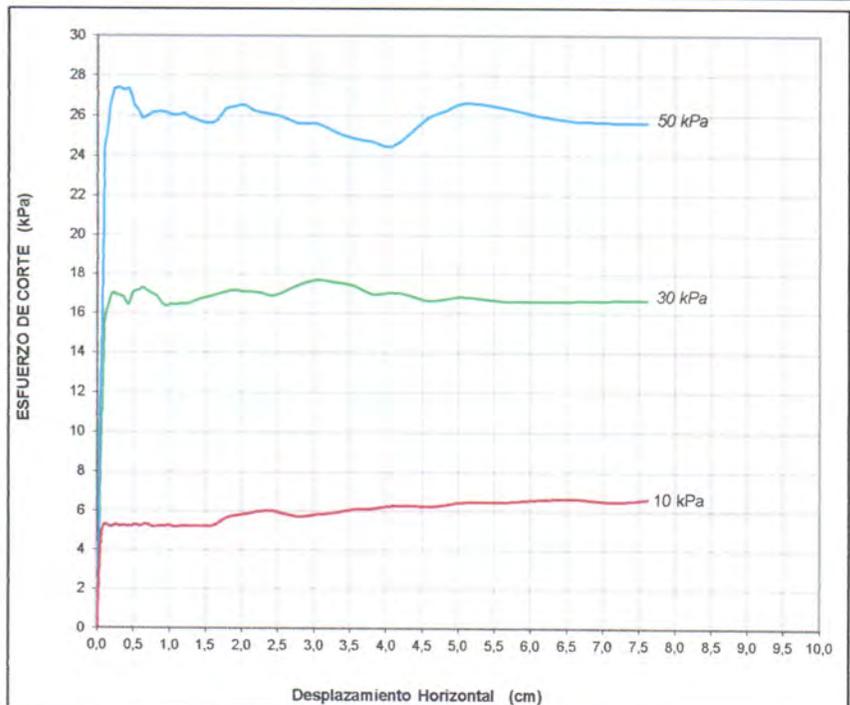
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-3	
Clasificación SUCS	
GP	
Contenido de Humedad Inicial(%)	
1,60%	
Densidad Seca Inicial	
DS = 1,566 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 11,1%	2) 9,8%
3) 9,3%	

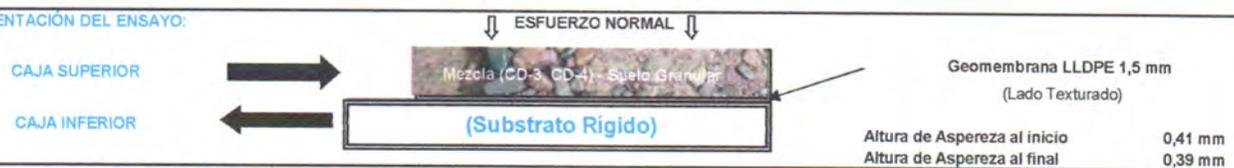


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-3 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo granular y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

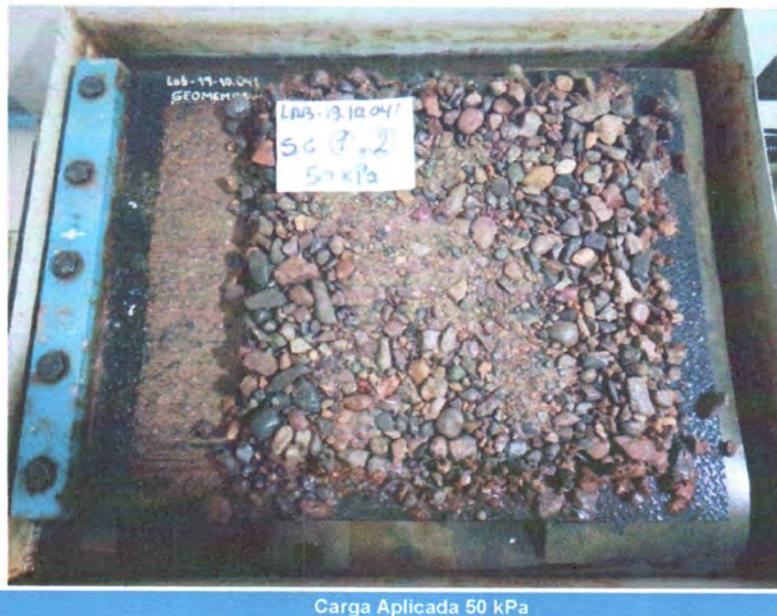
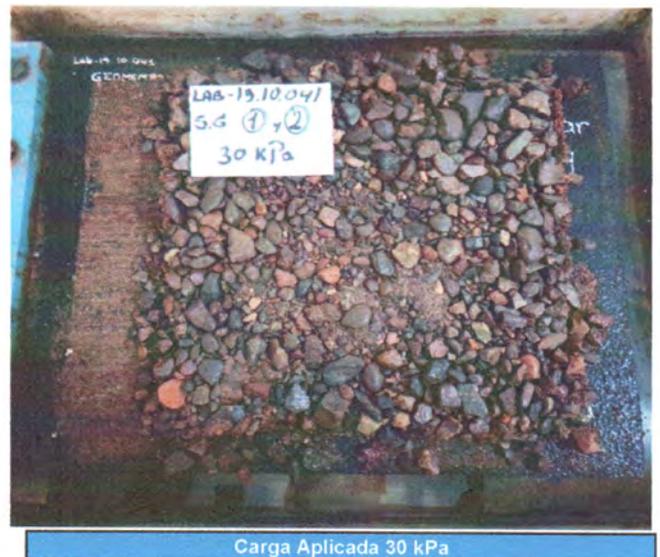
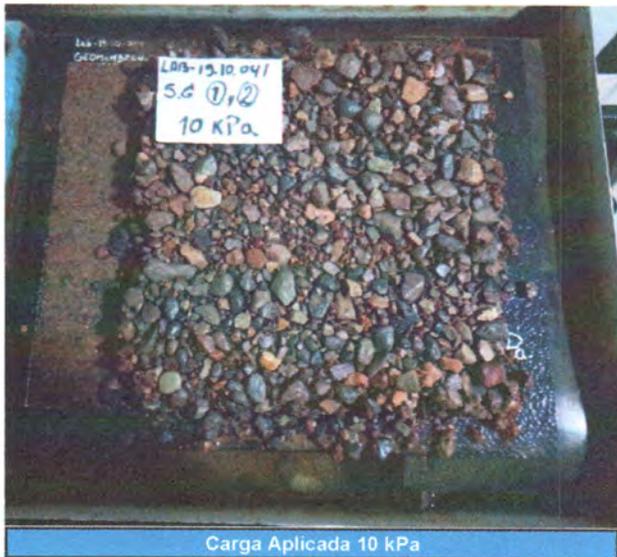
Nº de Informe: LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-3		
Material 2:	→ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

ANEXO C.2: INTERFASE GM-SBP

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate:  **Capa de Drenaje**

Fecha: **18/09/2019**

Material 1:  **SBP-01**

LSN: Fijado

Material 2:  **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

Substrato:  **Substrato Rígido**

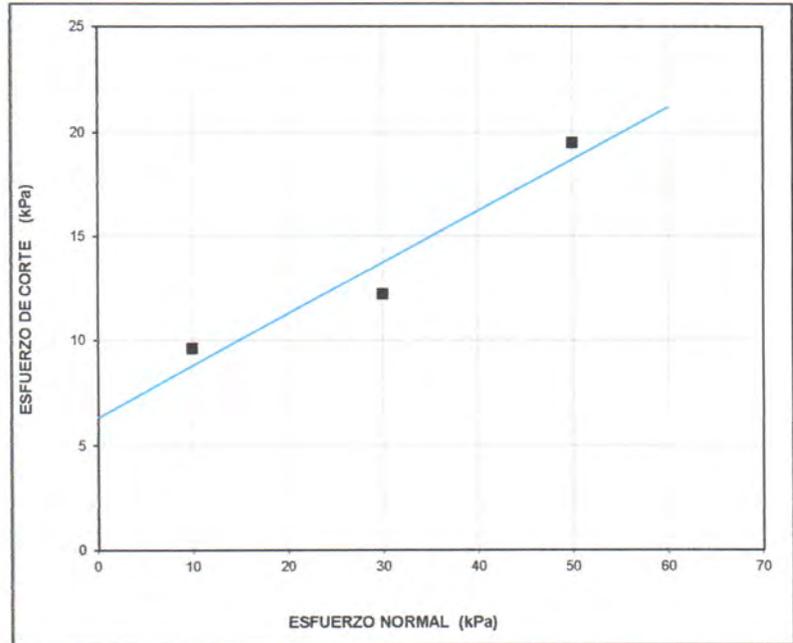
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (Valores Pico)			
Nº Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	9,6	44
2	30,0	12,2	22
3	50,0	19,5	21

Adhesión: 6,34 kPa

Ang. Fricción: 13,9 grados

Coefficiente de Fricción: 0,24

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



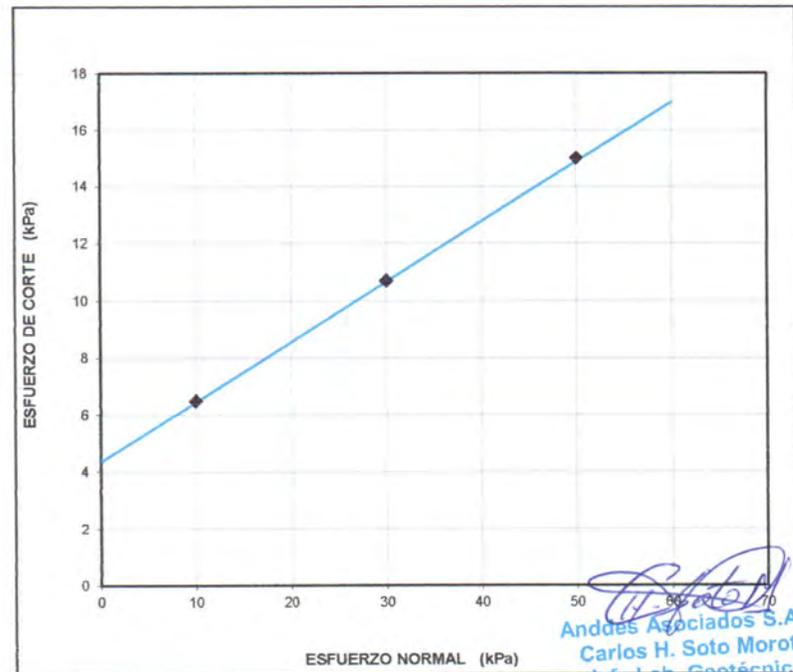
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm. de Desplazamiento)			
Nº Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	6,5	33
2	30,0	10,7	20
3	50,0	15,0	17

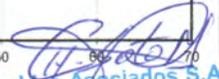
Adhesión: 4,36 kPa

Ang. Fricción: 11,9 grados

Coefficiente of Fricción: 0,21

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA




Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

Realizado por: **MP**

Ingresado por: **JCA**

Revisado por: **CSM**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Profundidad (m): ---

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-01

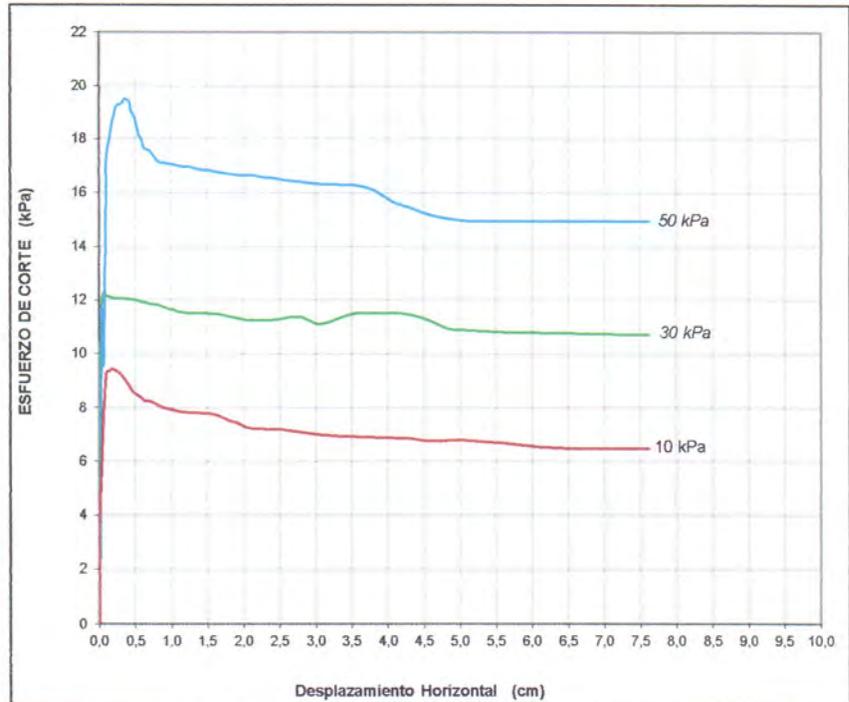
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
SBP-01	
Clasificación SUCS	
CH	
Contenido de Humedad Inicial (%)	
21,80%	
Densidad Seca Inicial	
(95% MDS = 1,618 gr/cm ³ del P.E.)	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 27,7%	2) 24,4%
	3) 23,7%


CONDICIONES ESTÁNDAR :
VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00" (76mm) de desplazamiento, salvo excepciones.
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo.
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:

NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo SBP-01 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-01

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

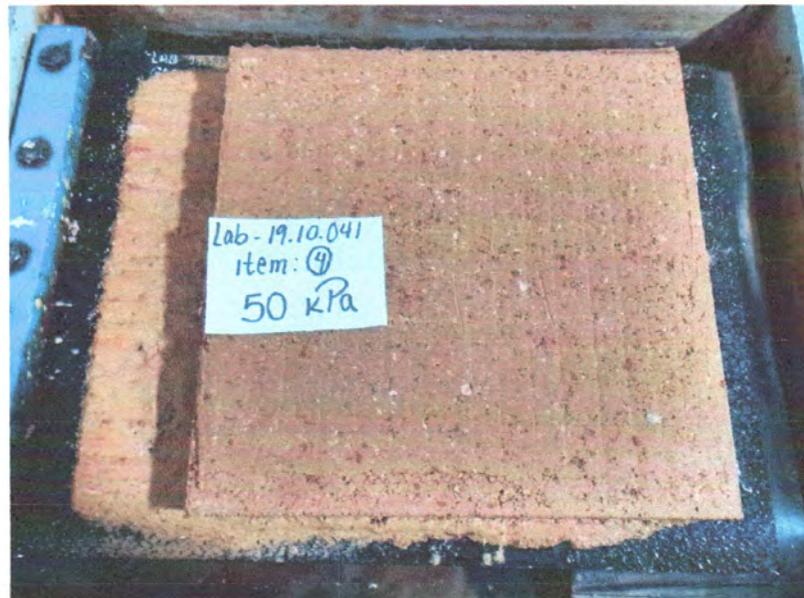
Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

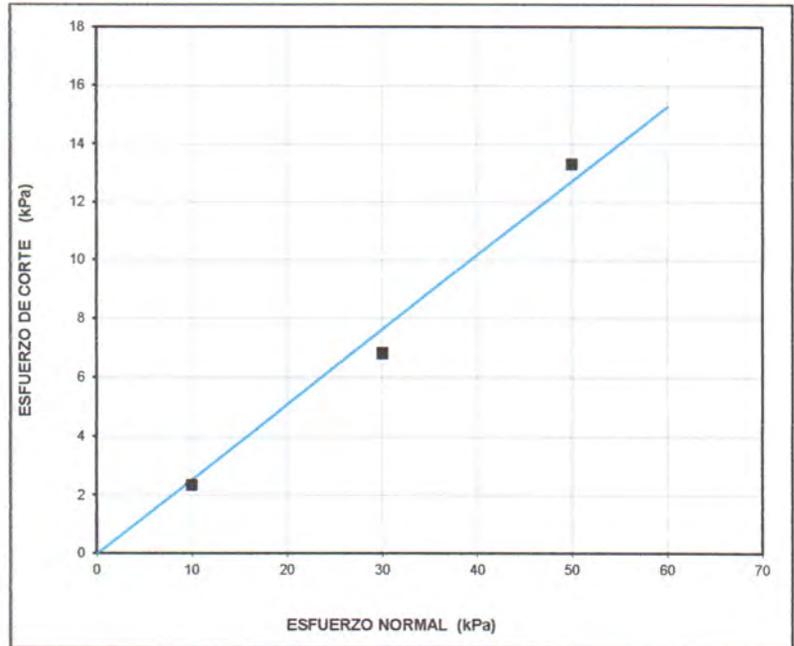
 Cliente: -
 Ubicación del Proyecto: -

 Zona: - Profundidad (m): ---
 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad** N° de Proyecto: -
 Solicitado Por: **Elard Quispe** N° de Informe: **LAB-19.10.041**
 Superstrate: ← **Capa de Drenaje** Fecha: **18/09/2019**
 Material 1: ← **SBP-02** LSN: **Fijado**
 Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**
 Substrato: → **Substrato Rígido**

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,4	13
2	30,0	6,8	13
3	50,0	13,3	15

Adhesión: 0,00 kPa
 Ang. Fricción: 14,3 grados
 Coeficiente de Fricción: 0,25

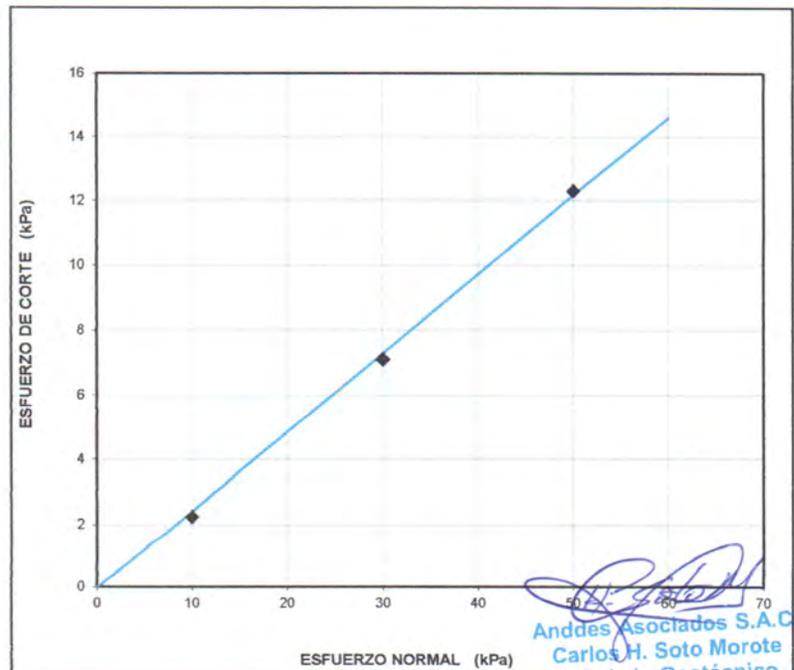
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	2,3	13
2	30,0	7,1	13
3	50,0	12,3	14

Adhesión: 0,00 kPa
 Ang. Fricción: 13,7 grados
 Coeficiente of Fricción: 0,24

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Carlos H. Soto Morote
 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

 Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-02

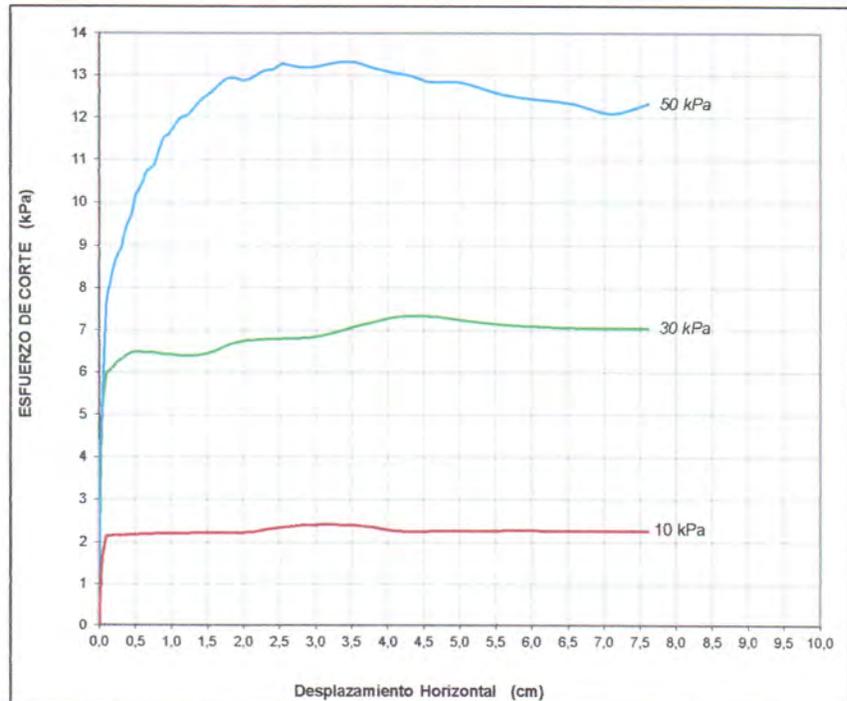
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

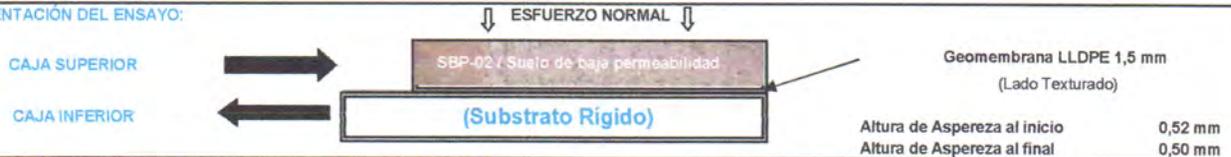
Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
SBP-02	
Clasificación SUCS CL	
Contenido de Humedad Inicial (%) 12,50%	
Densidad Seca Inicial (95% MDS = 1,993 gr/cm ³ del P.E.)	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 17,4%	2) 17,2%
3) 17,1%	


CONDICIONES ESTÁNDAR :
VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:

NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

- 1 Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
- 2 El suelo SBP-02 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
- 3 Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
- 4 El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
- 5 El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
- 6 Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
- 7 Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

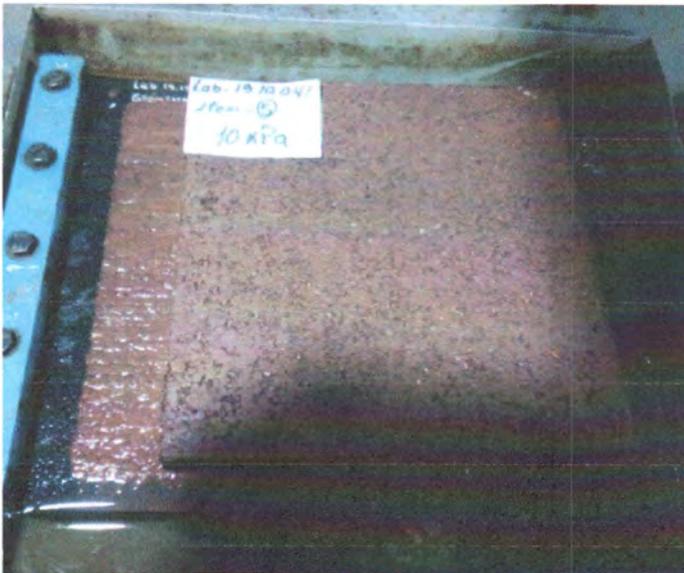
Material 1: ← SBP-02

LSN: Fijado

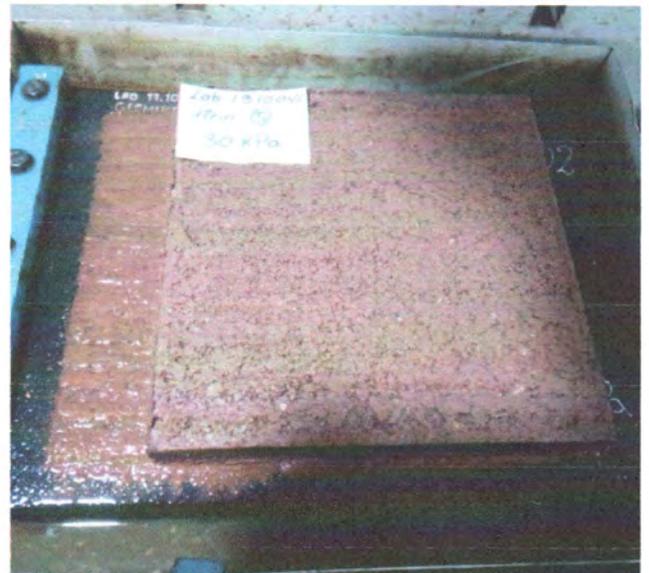
Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1: ← **SBP-02**

LSN: Fijado

 Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

 Substrato: → **Substrato Rígido**
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

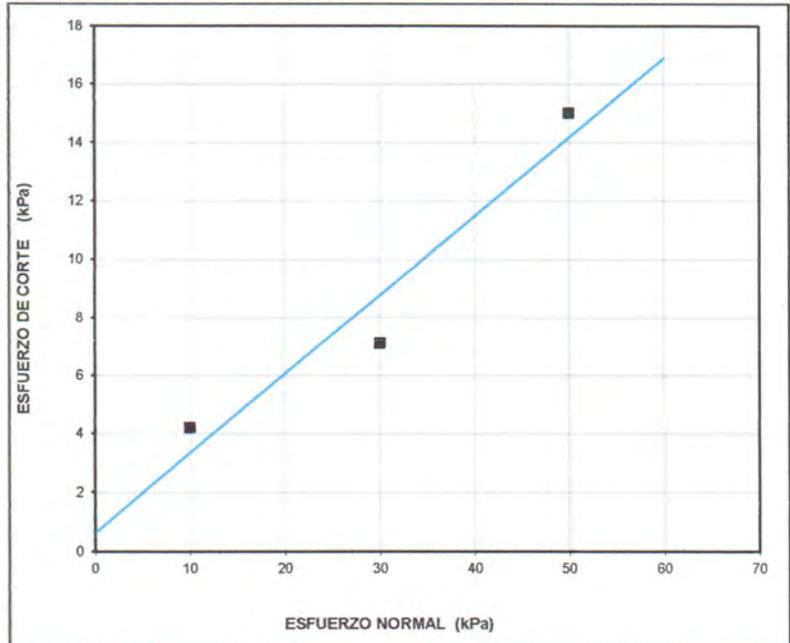
(2.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	4,2	23
2	30,0	7,1	13
3	50,0	15,0	17

Adhesión: 0,67 kPa

Ang. Fricción: 15,1 grados

Coeficiente de Fricción: 0,26

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

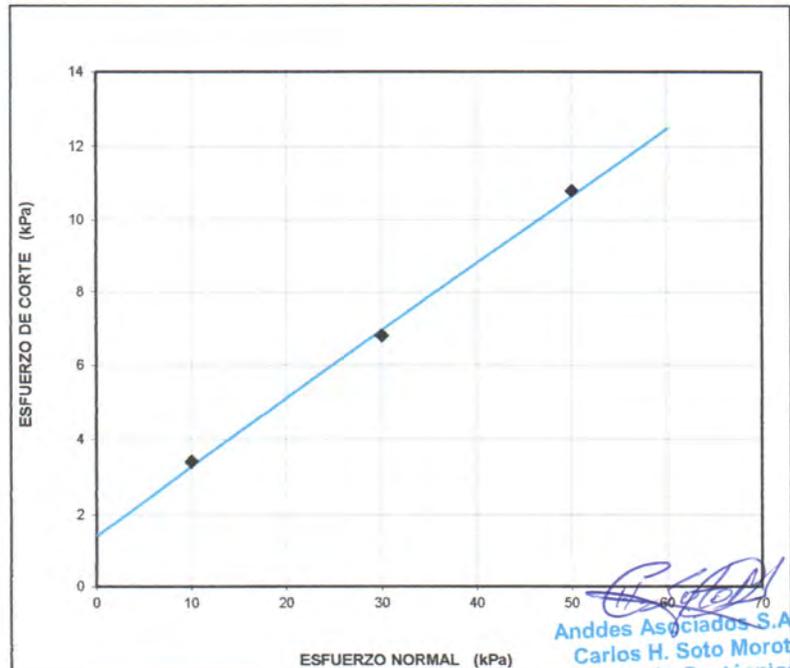
(7.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	3,4	19
2	30,0	6,8	13
3	50,0	10,8	12

Adhesión: 1,45 kPa

Ang. Fricción: 10,4 grados

Coeficiente of Fricción: 0,18

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP- 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-02

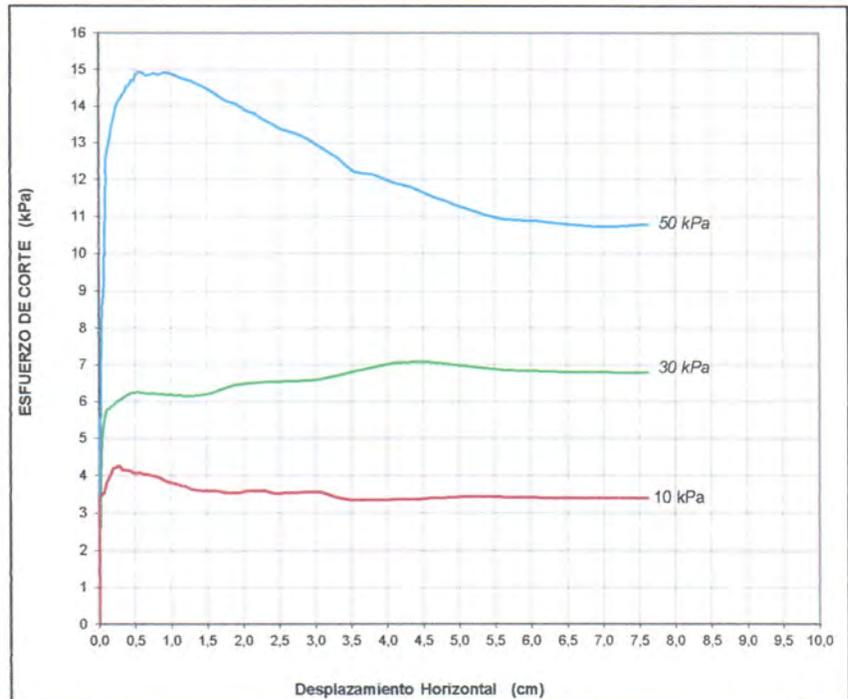
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

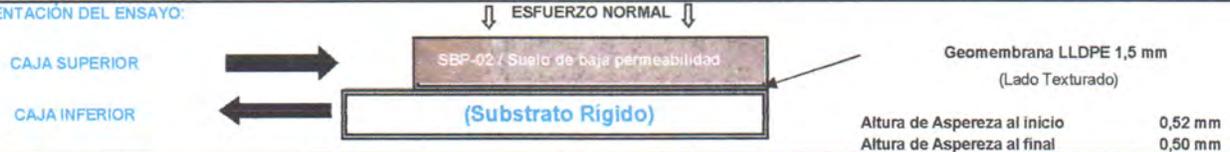
Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
SBP-02	
Clasificación SUCS	
CL	
Contenido de Humedad Inicial(%)	
12,50%	
Densidad Seca Inicial	
(95% MDS = 1,993 gr/cm ³ del P.E.)	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 11,9%	2) 11,6% 3) 11,2%


CONDICIONES ESTÁNDAR :
VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:

NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo SBP-02 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Joto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: Suelo de baja permeabilidad

Solicitado Por: Elard Quispe

Profundidad (m): ---

Nº de Proyecto: -

Nº de Informe: LAB-19.10.041

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: 18/09/2019

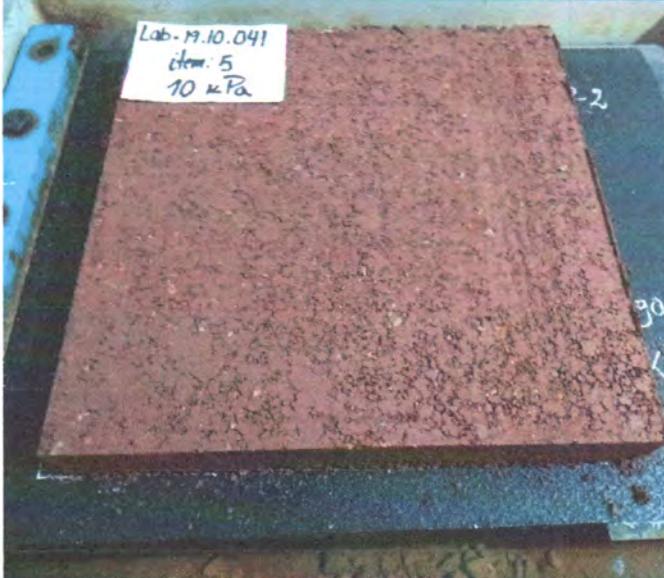
Material 1: ← SBP-02

LSN: Fijado

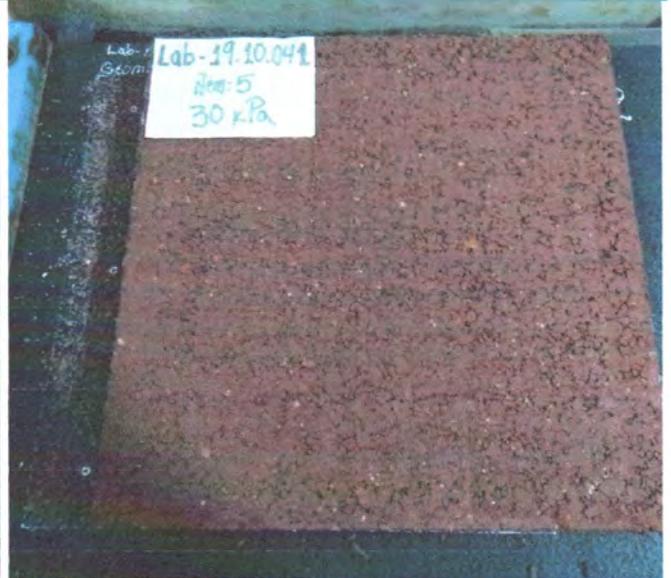
Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-03

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

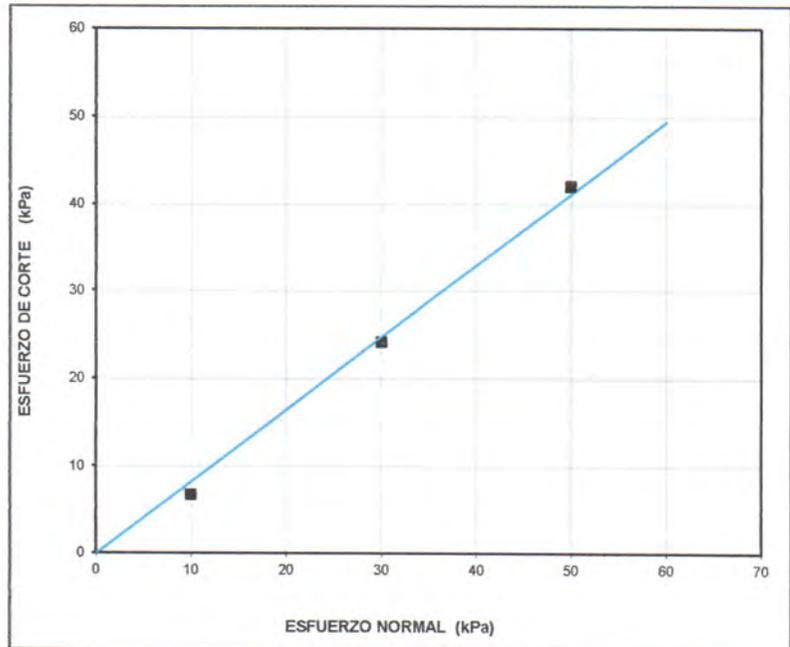
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

(Valores Pico)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	6,7	34
2	30,0	24,1	39
3	50,0	42,1	40

Adhesión: 0,00 kPa
 Ang. Fricción: 39,5 grados
 Coeficiente de Fricción: 0,69

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

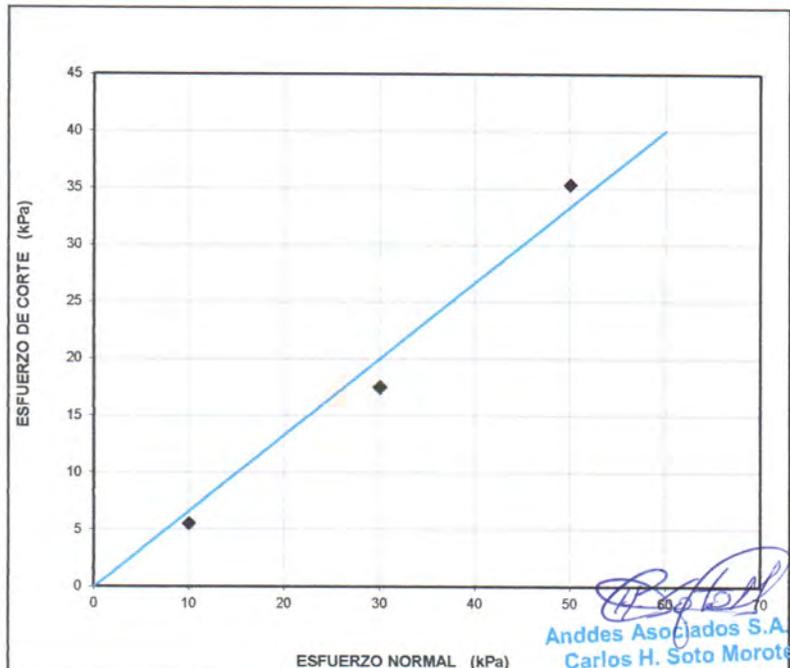
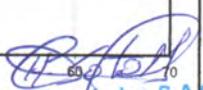

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

(7,5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	5,5	29
2	30,0	17,5	30
3	50,0	35,3	35

Adhesión: 0,00 kPa
 Ang. Fricción: 33,8 grados
 Coeficiente of Fricción: 0,59

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP- 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Profundidad (m): ---

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-03

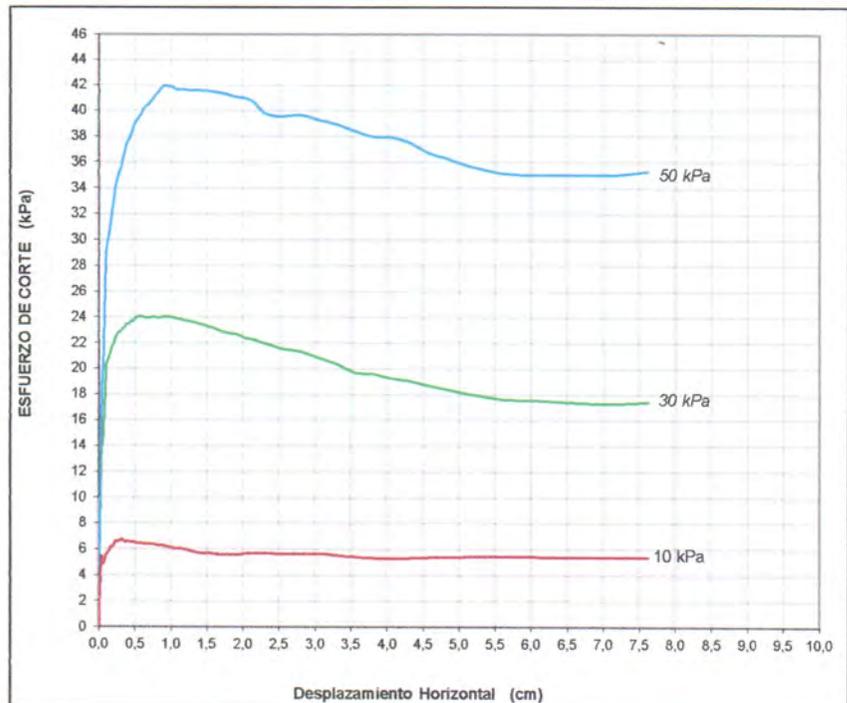
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

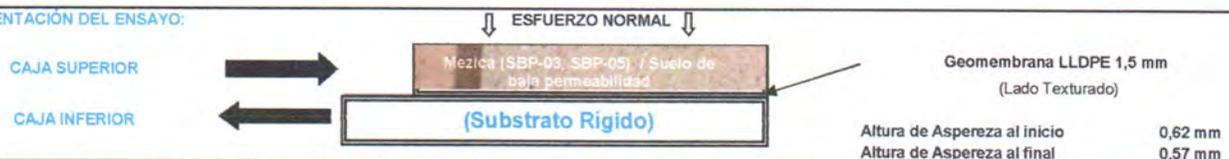
Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
SBP-03	
Clasificación SUCS	
SC	
Contenido de Humedad Inicial(%)	
14,10%	
Densidad Seca Inicial	
(95% MDS = 1,888 gr/cm ³ del P.E.)	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 18,6%	2) 16,5%
	3) 15,8%


CONDICIONES ESTÁNDAR:
VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:

NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada especimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo SBP-03 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada especimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.


Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

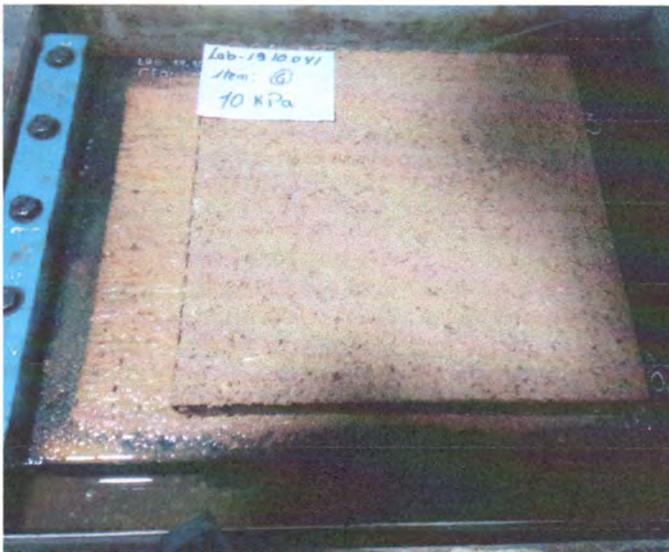
LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -
Ubicación del Proyecto: -
Zona: - Profundidad (m): ---
Descripción: **Suelo de baja permeabilidad** N° de Proyecto: -
Solicitado Por: **Elard Quispe** N° de Informe: **LAB-19.10.041**
Superstrate: ← Capa de Drenaje Fecha: **18/09/2019**
Material 1: ← SBP-03 LSN: Fijado
Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)
Substrato: → Substrato Rígido

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Profundidad (m): ---

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← **SBP-04**

LSN: Fijado

Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

Substrato: → **Substrato Rígido**

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

(Valores Pico)

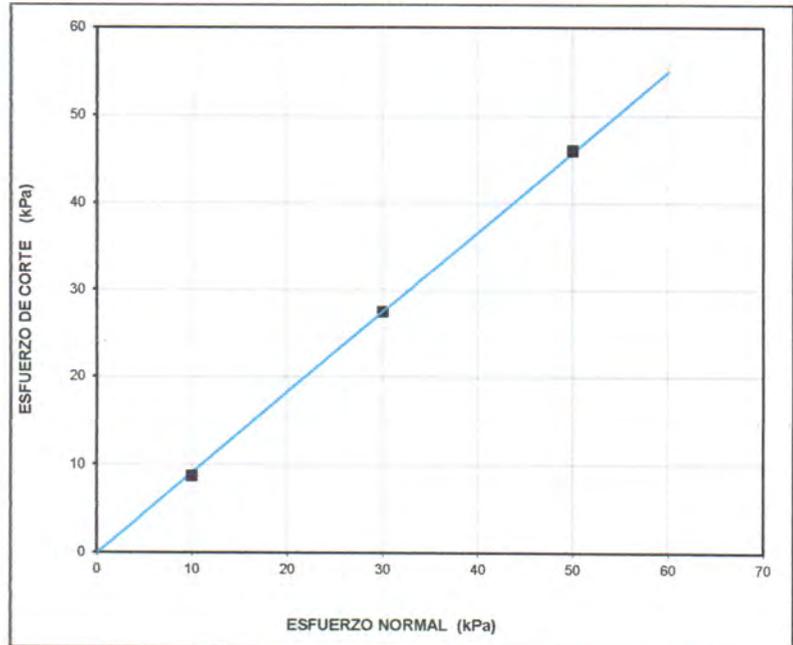
N° Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Angulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	8,7	41
2	30,0	27,4	42
3	50,0	46,0	43

Adhesión: 0,00 kPa

Ang. Fricción: 42,5 grados

Coefficiente de Fricción: 0,74

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

(7.5 cm. de Desplazamiento)

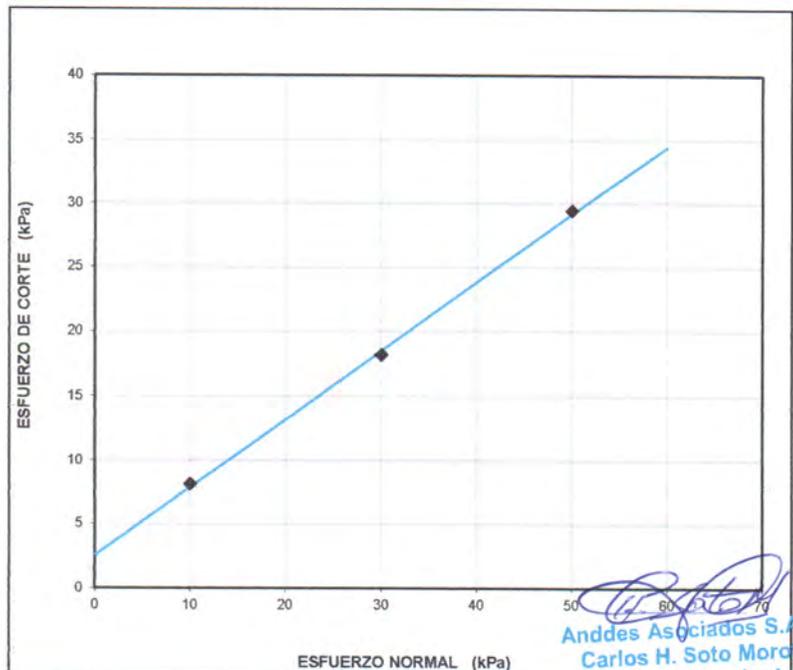
N° Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Angulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	8,1	39
2	30,0	18,2	31
3	50,0	29,4	30

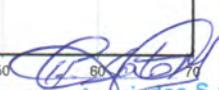
Adhesion: 2,59 kPa

Ang. Fricción: 28,0 grados

Coefficiente of Fricción: 0,49

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA




Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Profundidad (m): ---

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-04

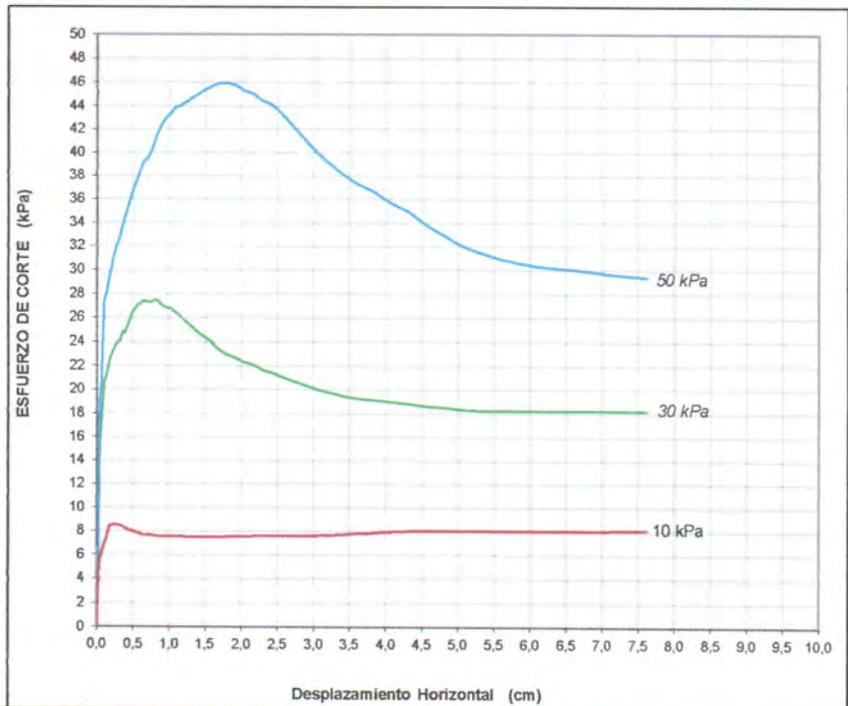
LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
SBP-04	
Clasificación SUCS	
CL	
Contenido de Humedad Inicial (%)	
17,10%	
Densidad Seca Inicial	
(95% MDS = 1,797 gr/cm ³ del P.E.)	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 23,1%	2) 19,2% 3) 16,3%

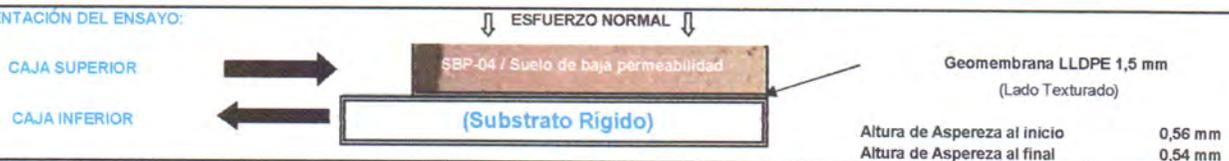


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones.
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo SBP-04 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: Suelo de baja permeabilidad

N° de Proyecto: -

Solicitado Por: Elard Quispe

N° de Informe: LAB-19.10.041

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: 18/09/2019

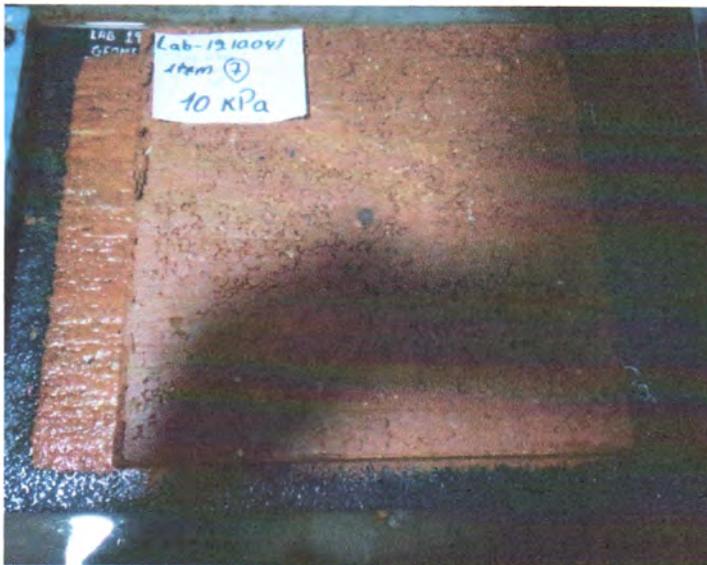
Material 1: ← SBP-04

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Profundidad (m): ---

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1: ← **SBP-04**

LSN: Fijado

 Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

 Substrato: → **Substrato Rígido**
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

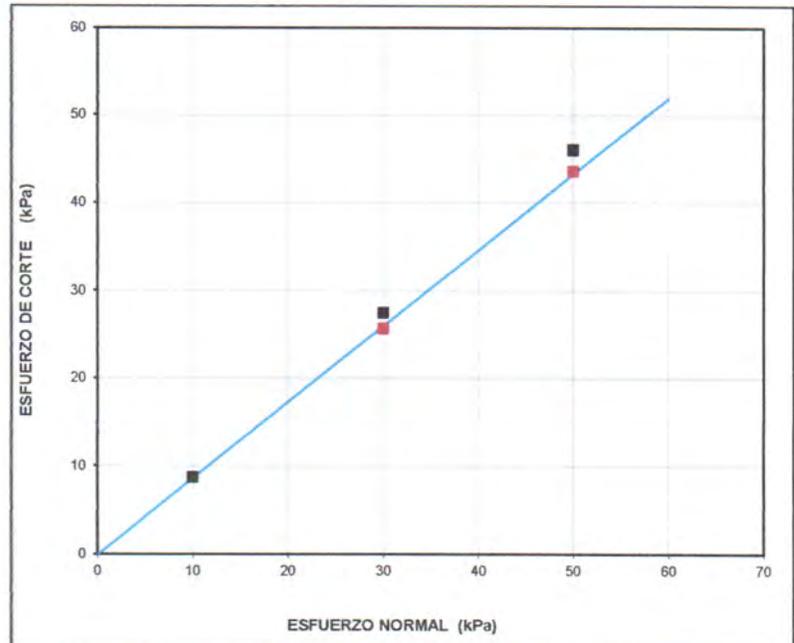
(Valores Pico)

N° Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	8,7	41
2	30,0	27,4	42
2	30,0	25,7	41
3	50,0	46,0	43
3	50,0	43,6	41

Adhesión: 0,00 kPa

Ang. Fricción: 40,9 grados

Coeficiente de Fricción: 0,71

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

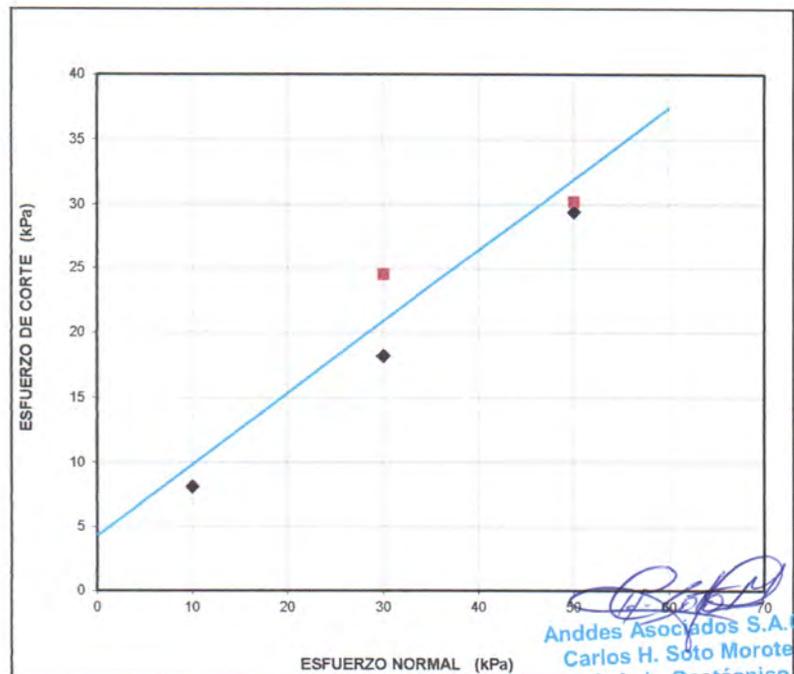
(7,5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	8,1	39
2	30,0	18,2	31
2	30,0	24,5	39
3	50,0	29,4	30
3	50,0	30,2	31

Adhesión: 4,36 kPa

Ang. Fricción: 28,9 grados

Coeficiente of Fricción: 0,50

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: - Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo de baja permeabilidad** N° de Proyecto: -

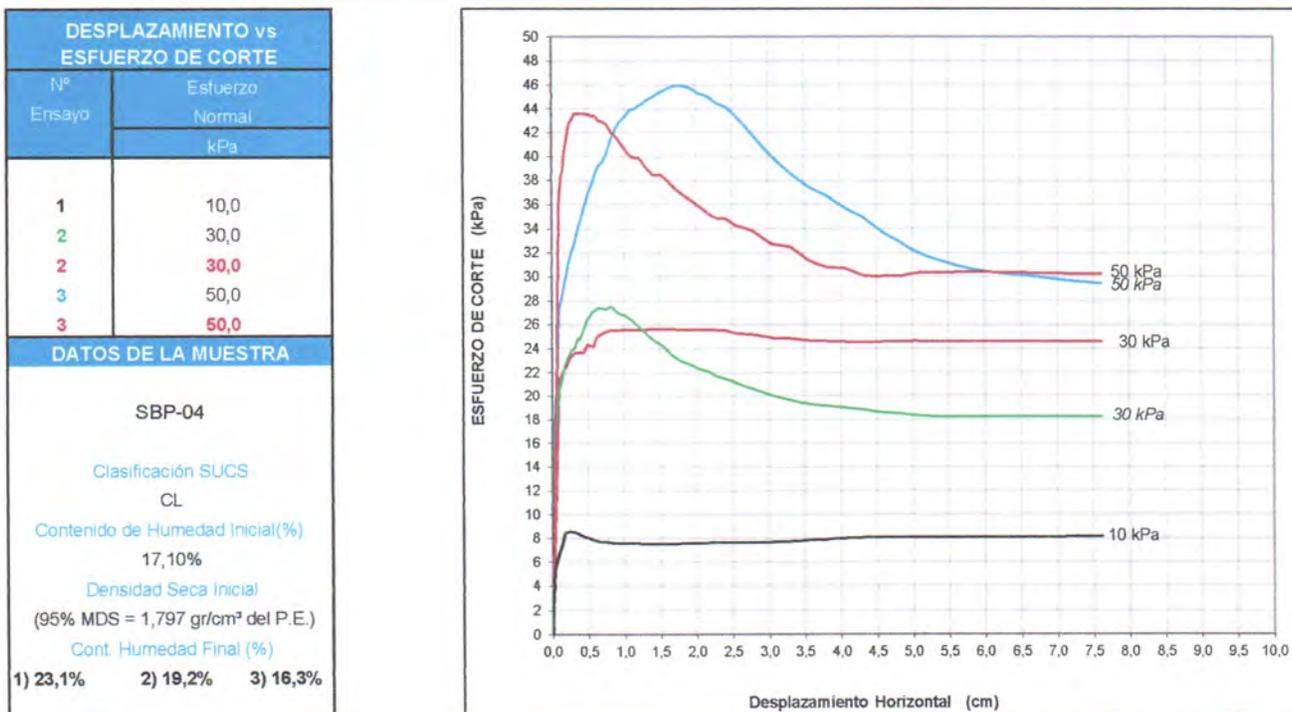
Solicitado Por: **Elard Quispe** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← SBP-04 LSN: Fijado

Material 2: ⇒ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: ⇒ Substrato Rígido

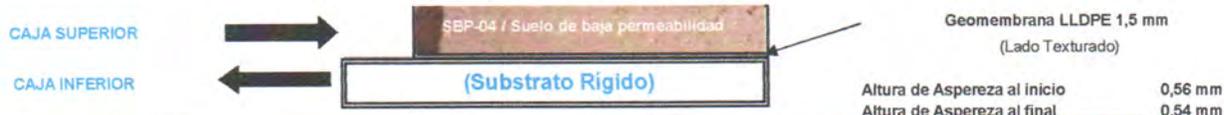


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo SBP-04 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

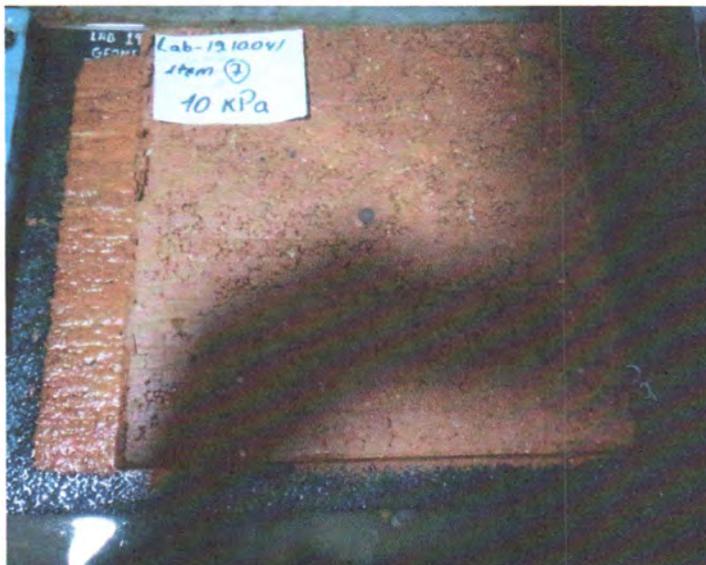
Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← SBP-04		
Material 2:	→ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo de baja permeabilidad**

Profundidad (m): ---

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

 Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Material 1: ← **SBP-06**

 Fecha: **18/09/2019**

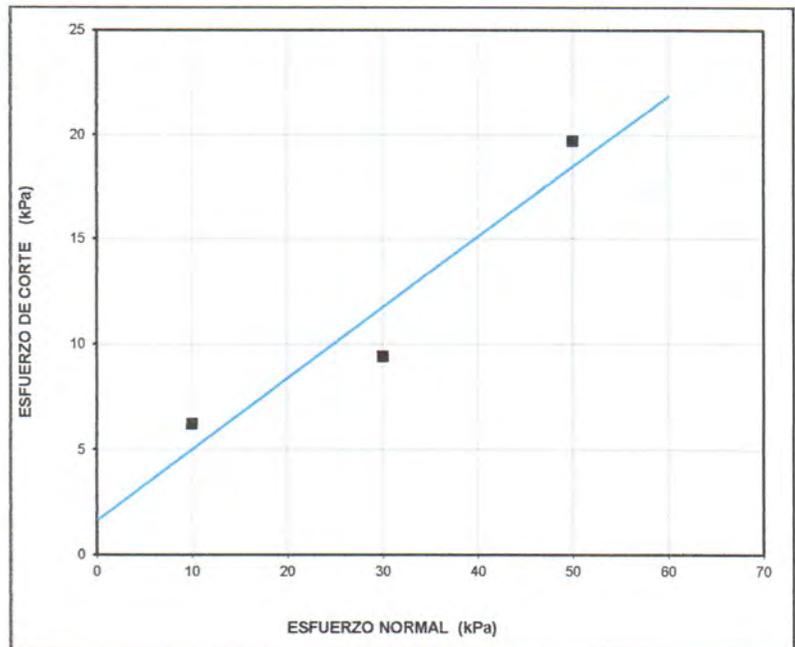
 Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

LSN: Fijado

 Substrato: → **Substrato Rígido**

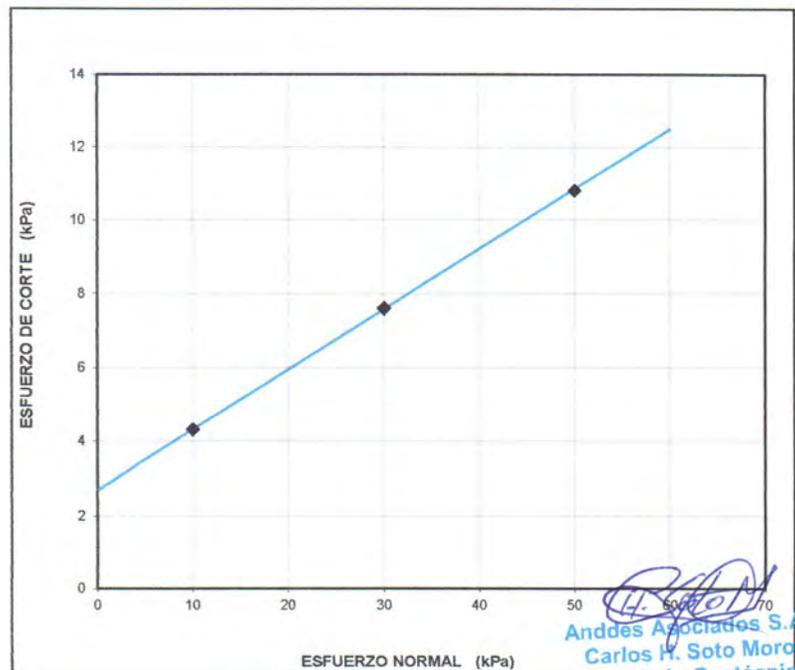
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (Valores Pico)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	6,2	32
2	30,0	9,4	17
3	50,0	19,7	22
Adhesión:		1,64	kPa
Ang. Fricción:		18,7	grados
Coeficiente de Fricción:		0,33	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7,5 cm. de Desplazamiento)			
N Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	4,3	23
2	30,0	7,6	14
3	50,0	10,8	12
Adhesión:		2,69	kPa
Ang. Fricción:		9,3	grados
Coeficiente of Fricción:		0,16	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



(Firma)
 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

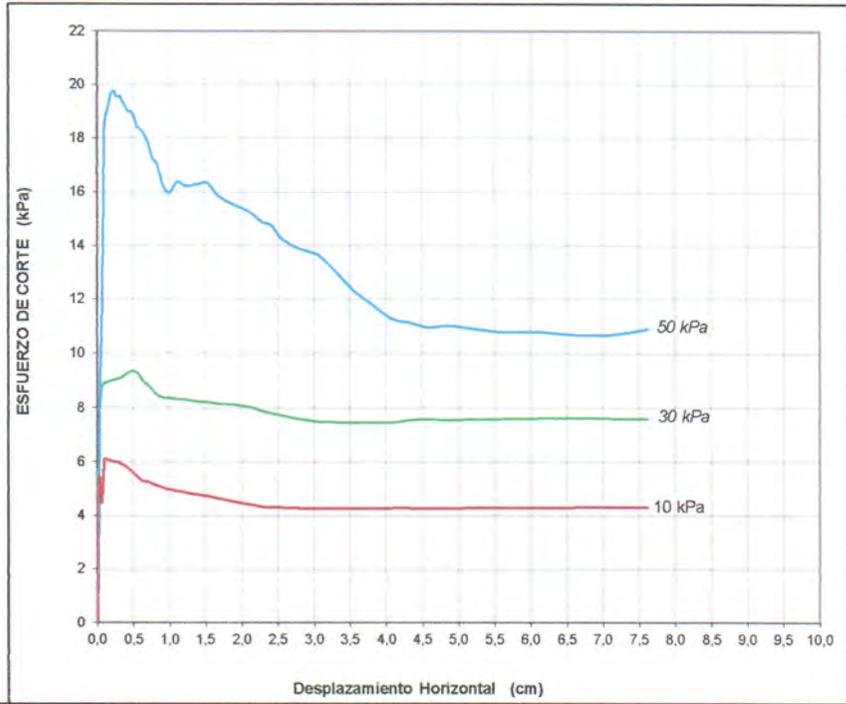
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← SBP-06		
Material 2:	⇒ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

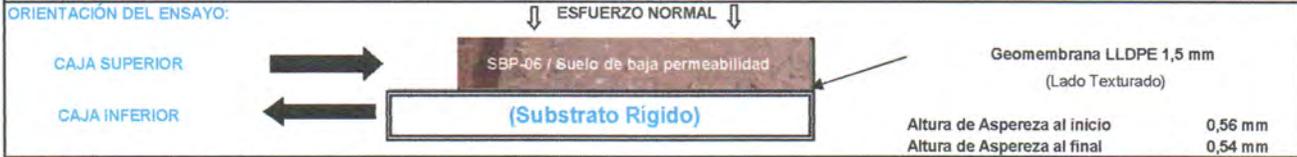
DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
SBP-06	
Clasificación SUCS CL	
Contenido de Humedad Inicial(%) 17,50%	
Densidad Seca Inicial (95% MDS = 1,755 gr/cm³ del P.E.)	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 22,8%	2) 20,7%
3) 21,9%	



CONDICIONES ESTÁNDAR: **VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min**

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00" (76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12' x 12" (300x300 mm).



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo SBP-06 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de suelo de baja permeabilidad y geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

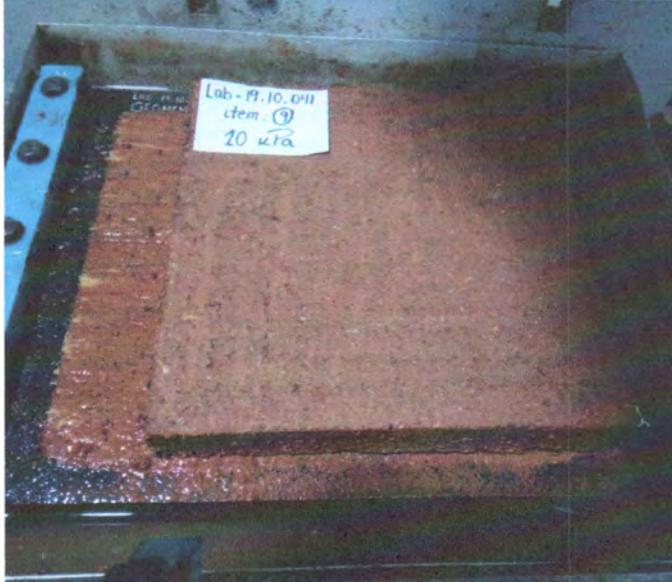
Carlos H. Voto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Voto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-		Profundidad (m): ---
Descripción:	Suelo de baja permeabilidad		Nº de Proyecto: -
Solicitado Por:	Elard Quispe		Nº de Informe: LAB-19.10.041
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Fecha: 18/09/2019	
Material 1:	← SBP-06	LSN: Fijado	
Material 2:	⇒ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

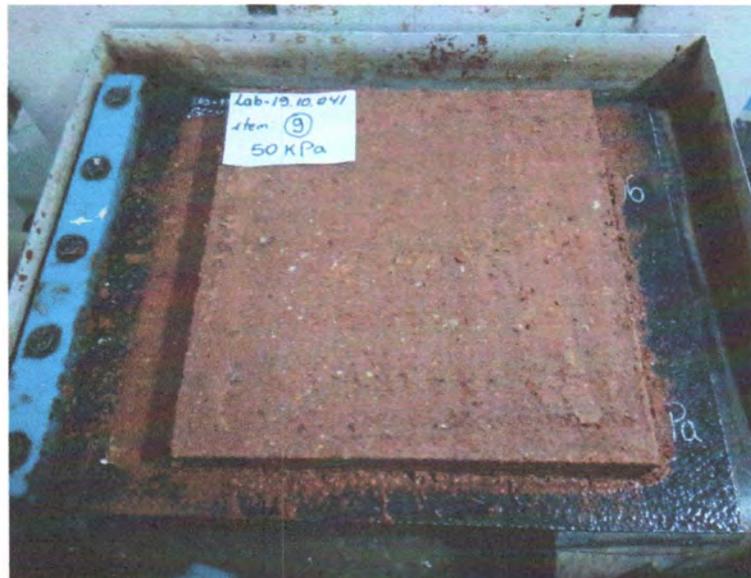
Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

ANEXO C.3: INTERFASE GCL-SG

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1: ← **CD-1 - Suelo Granular**

 LSN: **Fijado**

 Material 2: → **GCL**

 Substrato: → **Substrato Rígido**
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

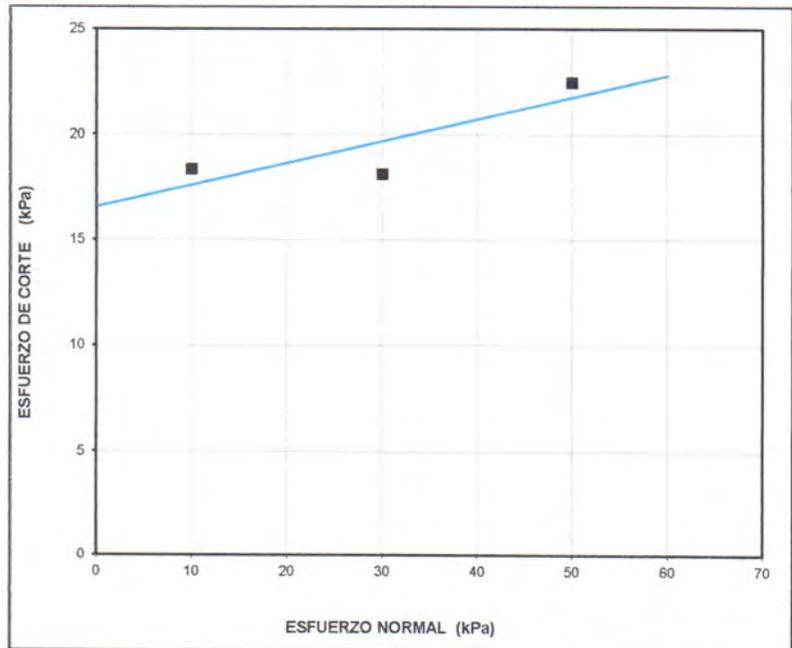
(2.5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	18,4	61
2	30,0	18,1	31
3	50,0	22,5	24

Adhesión: 16,59 kPa

Ang. Fricción: 5,9 grados

Coeficiente de Fricción: 0,10

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

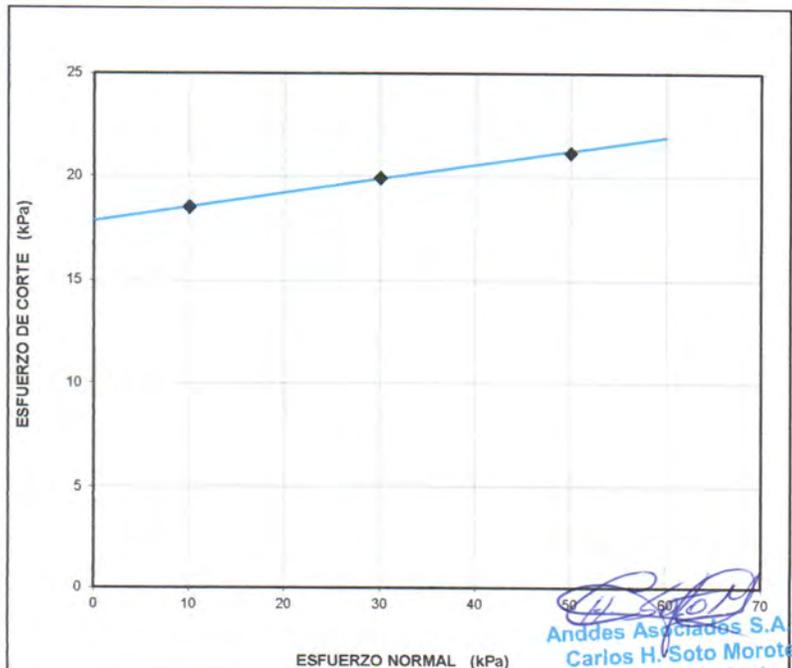
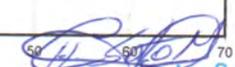
(7.5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	18,5	62
2	30,0	19,9	34
3	50,0	21,1	23

Adhesión: 17,88 kPa

Ang. Fricción: 3,8 grados

Coeficiente of Fricción: 0,07

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnica
 CIP- 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

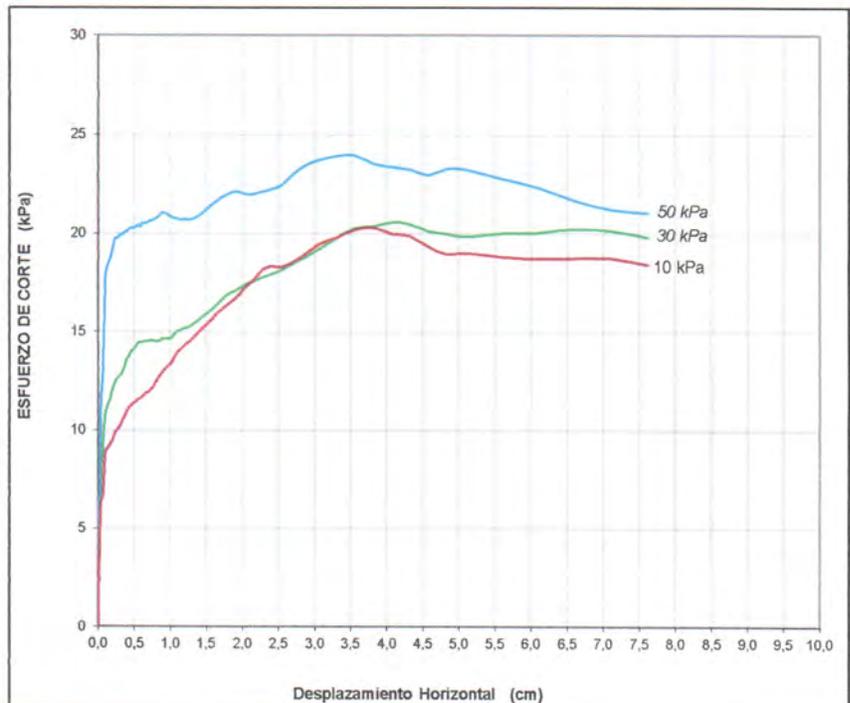
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

 Cliente: -
 Ubicación del Proyecto: -

Zona:	-	Profundidad (m):	---
Descripción:	Suelo Granular	Nº de Proyecto:	-
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Fecha:	18/09/2019
Material 1:	← CD-1 - Suelo Granular	LSN:	Fijado
Material 2:	⇒ GCL		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

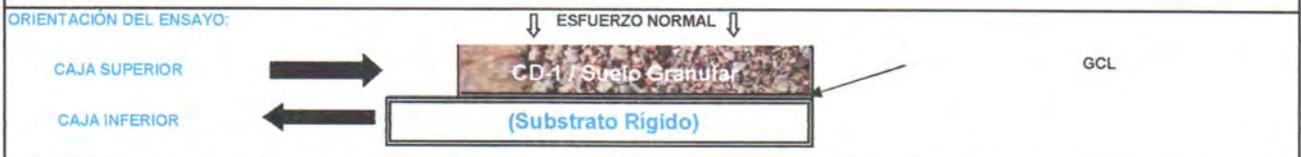
DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-1 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS SP	
Contenido de Humedad Inicial(%) 2,00%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,337 gr/cm³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 5,4%	2) 4,9% 3) 4,2%



CONDICIONES ESTÁNDAR: **VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min**

- La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
- Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
- El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
- El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
- Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

- Cada espécimen de GCL fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
- El suelo CD-1 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
- Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
- El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
- El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y suelo granular
- Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
- Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

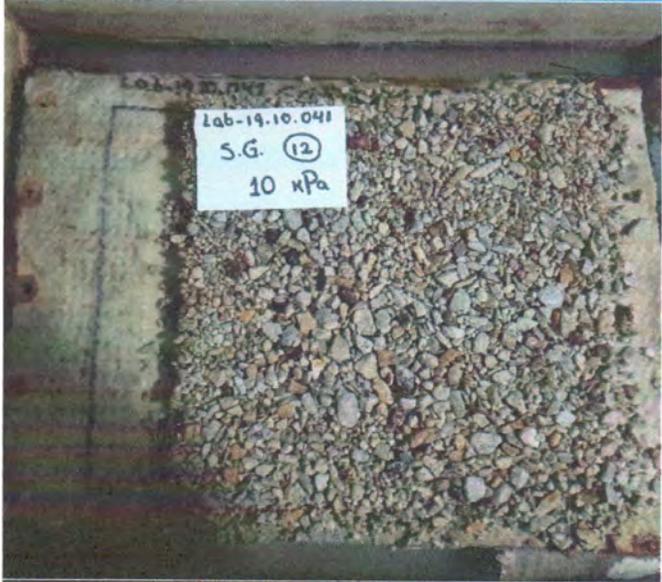

Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

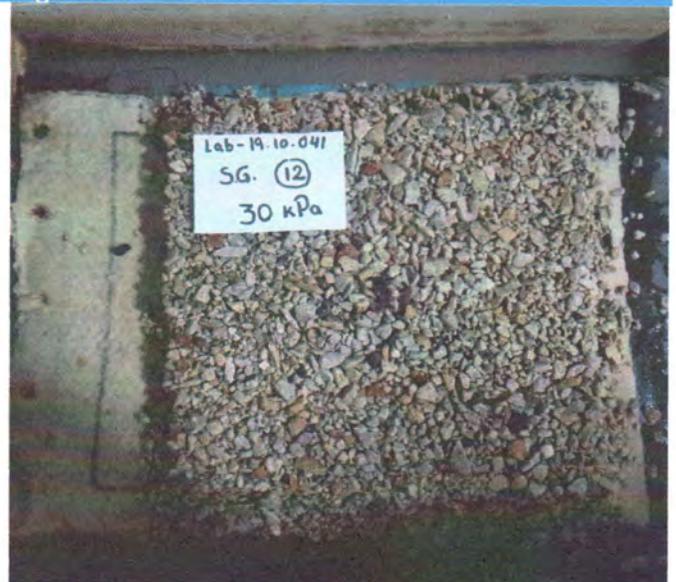
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-		
Descripción:	Suelo Granular	Profundidad (m):	---
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Proyecto:	-
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Material 1:	← CD-1 - Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Material 2:	⇒ GCL	LSN:	Fijado
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 100 kPa



Carga Aplicada 200 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

[Handwritten Signature]
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

 Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

N° de Proyecto: -

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

 Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-1 - Suelo Granular

LSN: Fijado

Material 2: → GCL

Substrato: → Substrato Rígido

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

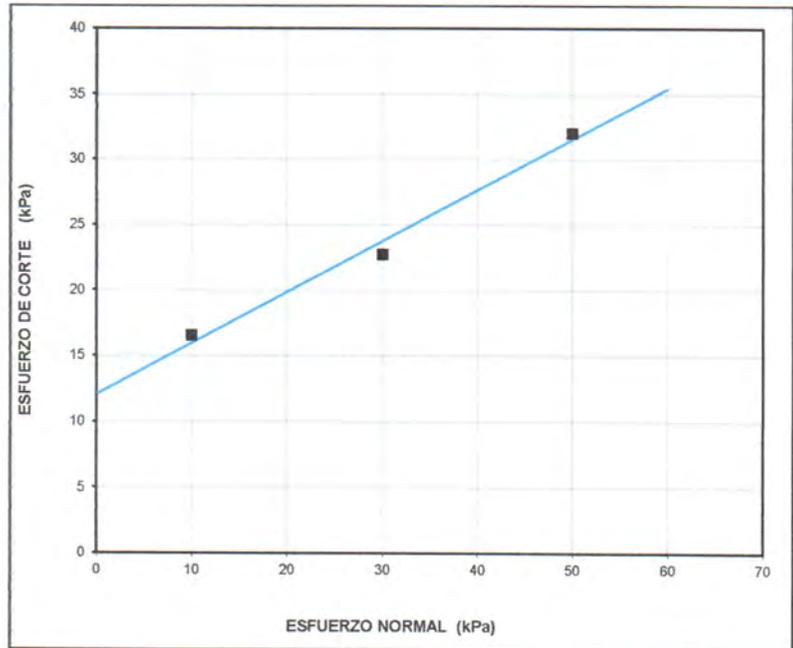
(2.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	16,5	59
2	30,0	22,7	37
3	50,0	32,0	33

Adhesión: 12,11 kPa

Ang. Fricción: 21,3 grados

Coeficiente de Fricción: 0,37

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

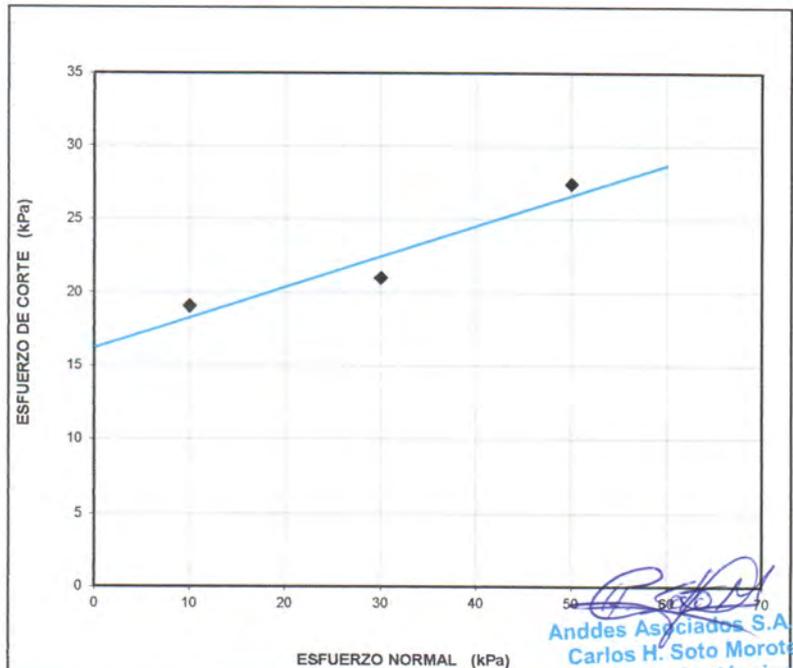
(7.5 cm de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	19,1	62
2	30,0	21,0	35
3	50,0	27,4	29

Adhesion: 16,28 kPa

Ang. Fricción: 11,7 grados

Coeficiente of Fricción: 0,20

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP- 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Descripción: **Suelo Granular**

Profundidad (m): ---

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Proyecto: -

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-1 - Suelo Granular

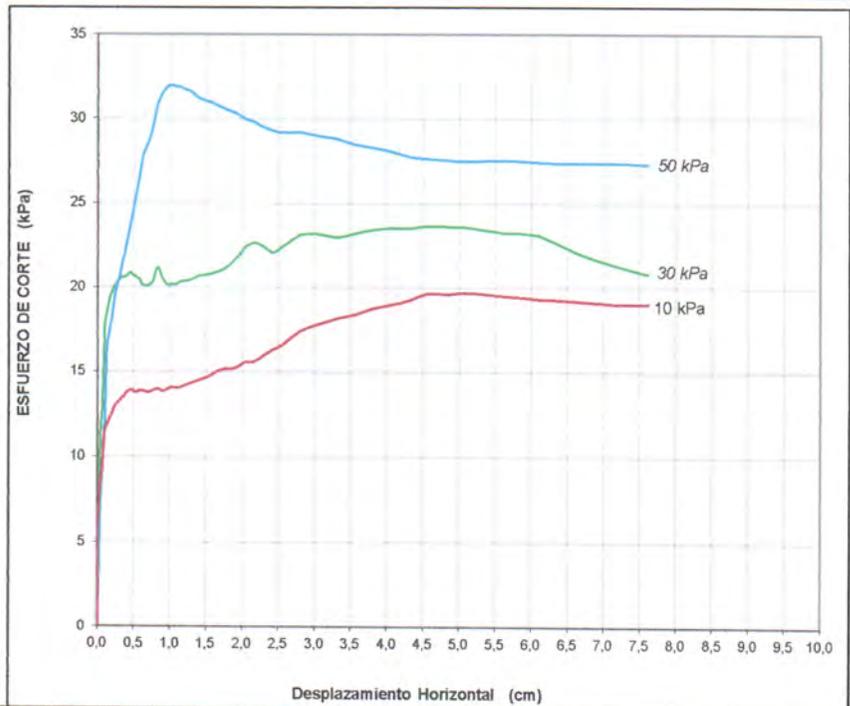
LSN: Fijado

Material 2: → GCL

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-1 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS SP	
Contenido de Humedad Inicial (%) 2,00%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,337 gr/cm³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 11,4%	2) 9,1% 3) 8,7%

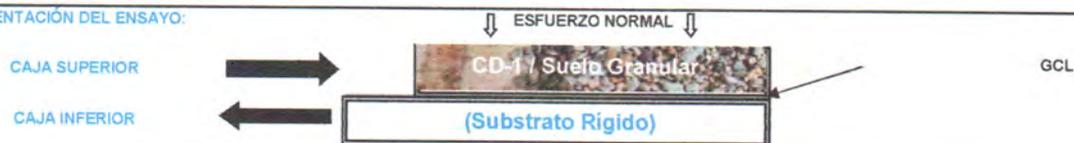


CONDICIONES ESTÁNDAR:

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00" (76mm) de desplazamiento, salvo excepciones.
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo.
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de GCL fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-1 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y suelo granular.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

[Firma]
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

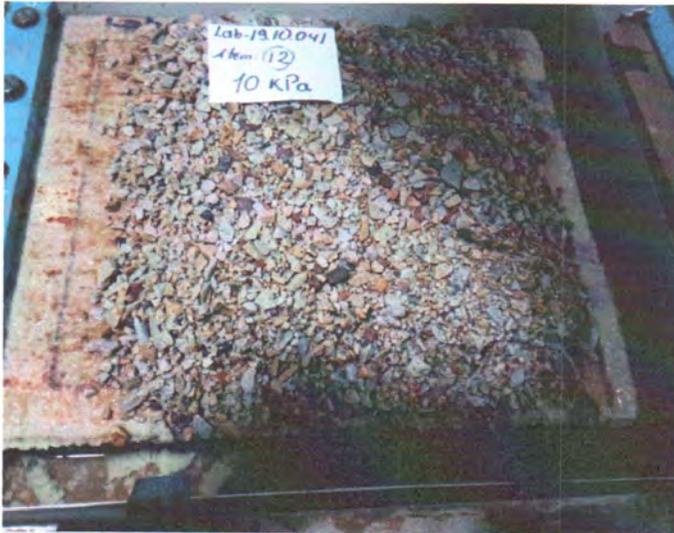
Nº de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-		Profundidad (m): ---
Descripción:	Suelo Granular		Nº de Proyecto: -
Solicitado Por:	Elard Quispe		Nº de Informe: LAB-19.10.041
Superstrate:	←	Capa de Drenaje	Fecha: 18/09/2019
Material 1:	←	CD-1 - Suelo Granular	LSN: Fijado
Material 2:	⇒	GCL	
Substrato:	⇒	Substrato Rígido	

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 100 kPa



Carga Aplicada 200 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

[Signature]
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

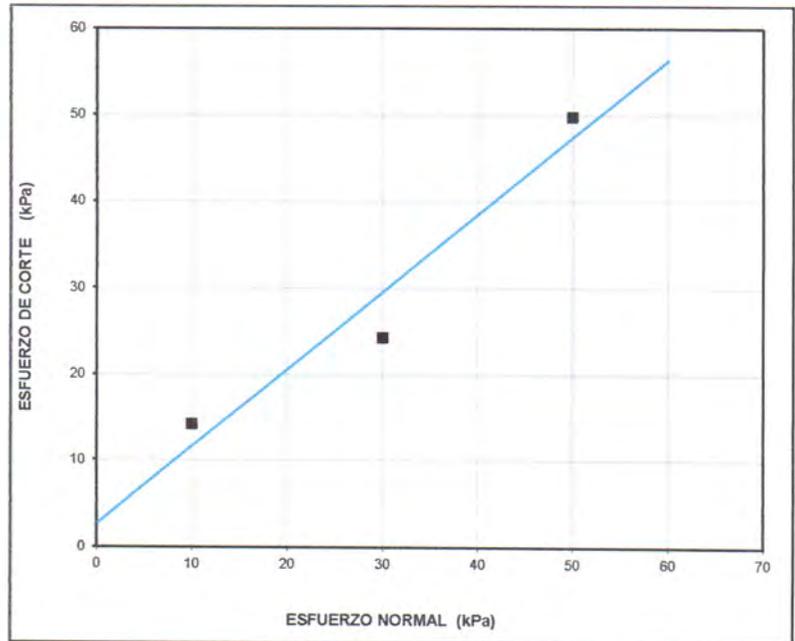
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	Nº de Proyecto:	-
Zona:	-	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-2 - Suelo Granular		
Material 2:	→ GCL		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm. de Desplazamiento)			
Nº Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	14,2	55
2	30,0	24,3	39
3	50,0	49,8	45

Adhesión:	2,73	kPa
Ang. Fricción:	41,8	grados
Coefficiente de Fricción:	0,73	

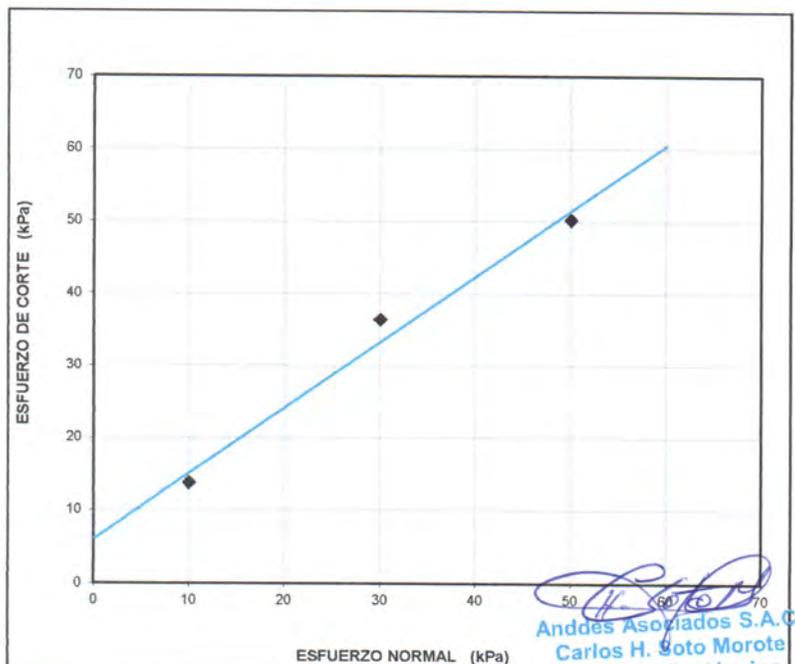
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm. de Desplazamiento)			
N Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	13,7	54
2	30,0	36,4	51
3	50,0	50,2	45

Adhesion:	6,06	kPa
Ang. Fricción:	42,3	grados
Coefficiente of Fricción:	0,74	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Carlos H. Goto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Goto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-2 - Suelo Granular

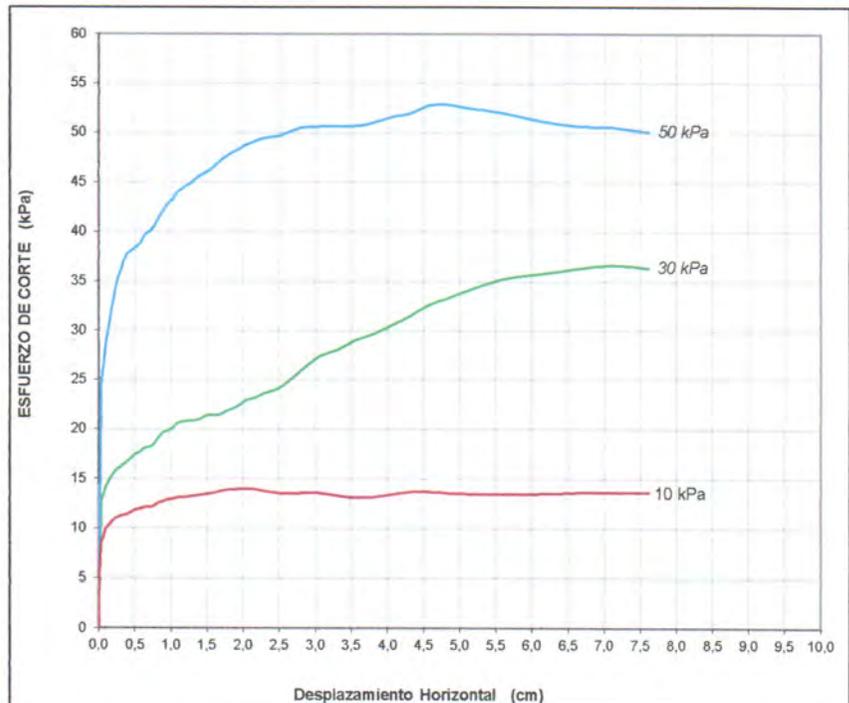
LSN: Fijado

Material 2: → GCL

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-2 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GP	
Contenido de Humedad Inicial (%) 1,90%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,039 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 2,1%	2) 1,9% 3) 1,8%

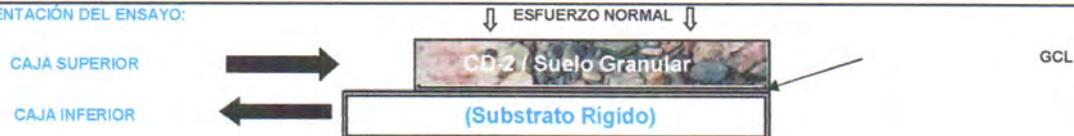


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00" (76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de GCL fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-2 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y suelo granular
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

Nº de Informe: LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-		Profundidad (m): ---
Descripción:	Suelo Granular	Nº de Proyecto: -	
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Informe: LAB-19.10.041	
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Fecha: 18/09/2019	
Material 1:	← CD-2 - Suelo Granular	LSN: Fijado	
Material 2:	⇒ GCL		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP. 87545

Carga Aplicada 50 kPa

Observación:
 Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

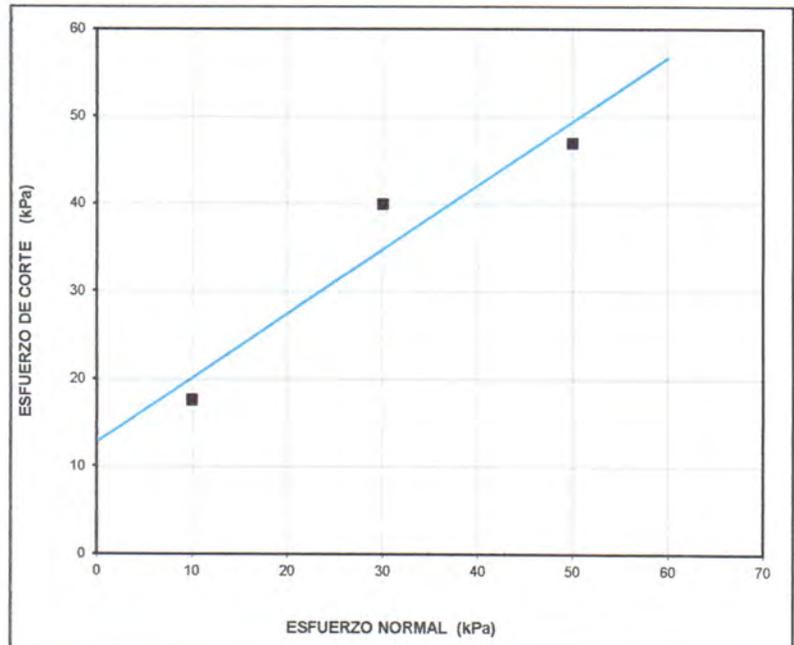
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

 Cliente: -
 Ubicación del Proyecto: -
 Zona: - Profundidad (m): ---
 Descripción: **Suelo Granular** N° de Proyecto: -
 Solicitado Por: **Elard Quispe** N° de Informe: **LAB-19.10.041**
 Superstrate: ← Capa de Drenaje Fecha: **18/09/2019**
 Material 1: ← CD-8 - Suelo Granular LSN: Fijado
 Material 2: → GCL
 Substrato: → Substrato Rígido

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	17,6	60
2	30,0	39,9	53
3	50,0	46,9	43

Adhesión: 12,83 kPa
 Ang. Fricción: 36,2 grados
 Coeficiente de Fricción: 0,63

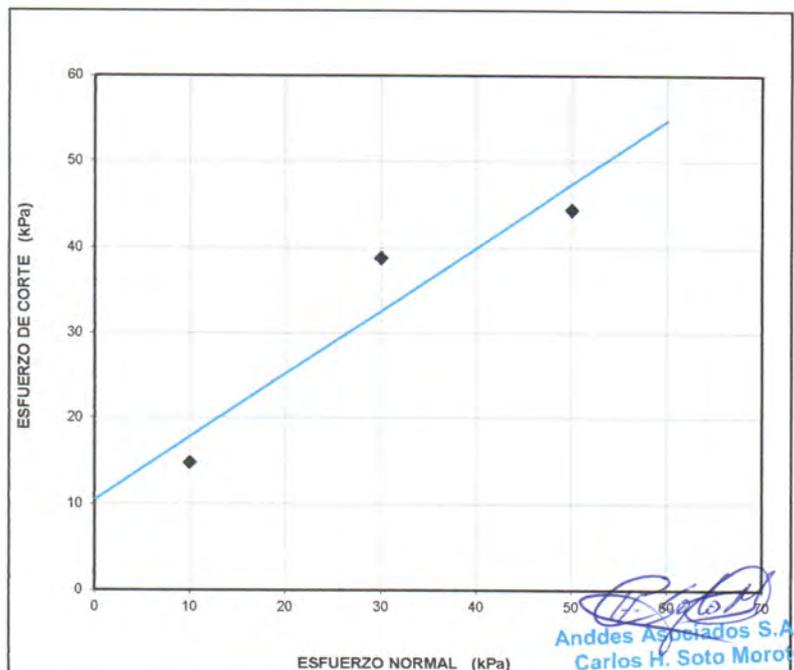
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	14,8	56
2	30,0	38,8	52
3	50,0	44,4	42

Adhesión: 10,47 kPa
 Ang. Fricción: 36,5 grados
 Coeficiente of Fricción: 0,64

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

Realizado por: MP Ingresado por: JCA Revisado por: CSM N° de Informe: LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-8 - Suelo Granular

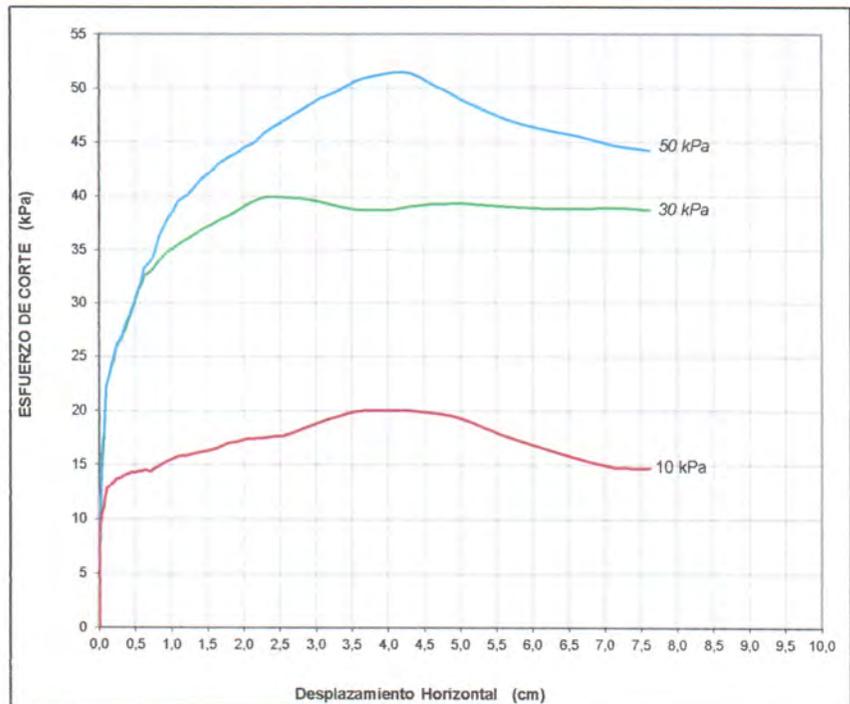
LSN: Fijado

Material 2: → GCL

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-8 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GP-GC	
Contenido de Humedad Inicial (%) 1,50%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,626 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 12,8%	2) 11,5% 3) 11,2%



CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de GCL fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El suelo CD-8 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remodelado según lo indicado por el cliente.
3. Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
4. El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y suelo granular
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-		Profundidad (m): ---
Descripción:	Suelo Granular	N° de Proyecto: -	
Solicitado Por:	Elard Quispe	N° de Informe: LAB-19.10.041	
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Fecha: 18/09/2019	
Material 1:	← CD-8 - Suelo Granular	LSN: Fijado	
Material 2:	→ GCL		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 100 kPa



Carga Aplicada 200 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

[Signature]
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

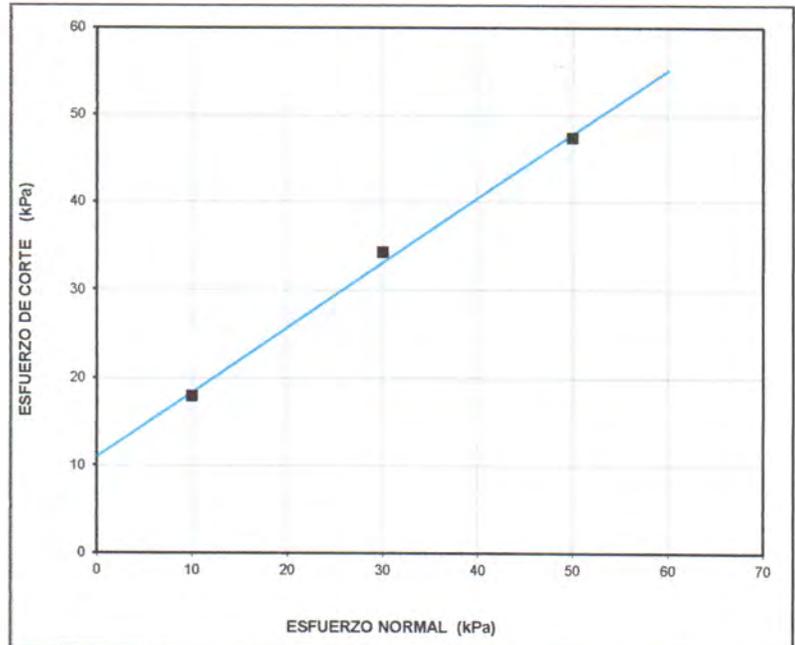
Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -
Ubicación del Proyecto: -
Zona: -
Descripción: **Suelo Granular**
Solicitado Por: **Elard Quispe**
Superstrate: ← **Capa de Drenaje**
Material 1: ← **CD-9 - Suelo Granular**
Material 2: → **GCL**
Substrato: → **Substrato Rígido**

Profundidad (m): ---
N° de Proyecto: -
N° de Informe: **LAB-19.10.041**
Fecha: **18/09/2019**
LSN: Fijado

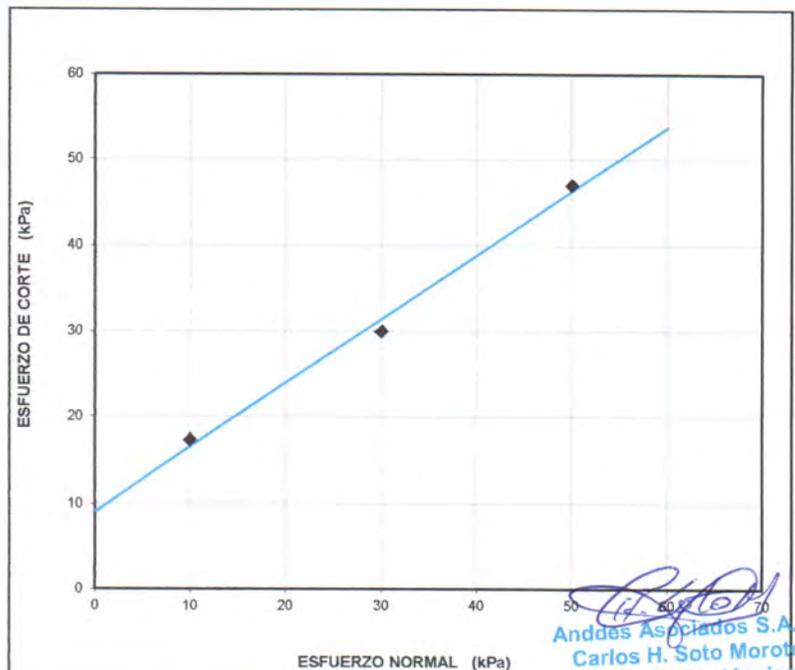
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Est. Normal kPa	Est. De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	17,9	61
2	30,0	34,2	49
3	50,0	47,4	43
Adhesión:		11,04	kPa
Ang. Fricción:		36,4	grados
Coeficiente de Fricción:		0,63	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm. de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Est. Normal kPa	Est. De Corte kPa	Ángulo Secante de Fricción Grados
1	10,0	17,3	60
2	30,0	30,0	45
3	50,0	47,0	43
Adhesión:		9,16	kPa
Ang. Fricción:		36,7	grados
Coeficiente of Fricción:		0,64	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: **MP** Ingresado por: **JCA** Revisado por: **CSM** N° de Informe: **LAB-19.10.041**

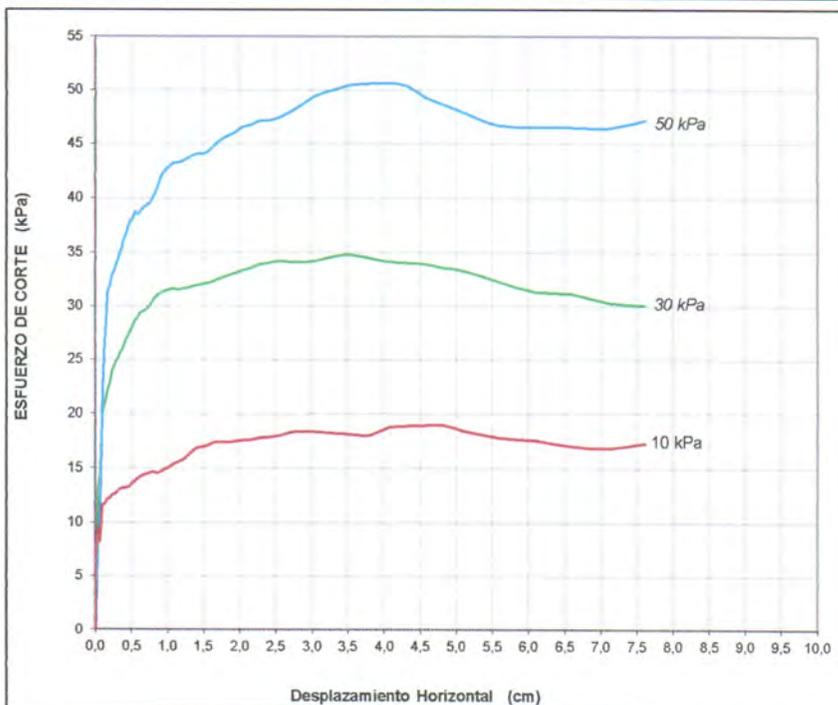
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente:	-	Profundidad (m):	---
Ubicación del Proyecto:	-	N° de Proyecto:	-
Zona:	-	N° de Informe:	LAB-19.10.041
Descripción:	Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Solicitado Por:	Elard Quispe	LSN:	Fijado
Superstrate:	← Capa de Drenaje		
Material 1:	← CD-9 - Suelo Granular		
Material 2:	⇒ GCL		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
N° Ensayo	Esfuerzo Normal (kPa)
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-9 - Suelo Granular	
Clasificación SUCS GC	
Contenido de Humedad Inicial (%) 1,75%	
Densidad Seca Inicial DS = 1,473 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 19,8%	2) 18,2% 3) 17,3%



CONDICIONES ESTÁNDAR : **VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min**

- La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
- Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
- El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
- El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
- Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

- Cada espécimen de GCL fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
- El suelo CD-9 - Suelo Granular fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente.
- Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
- El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
- El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y suelo granular
- Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
- Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	N° de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-		
Descripción:	Suelo Granular	Profundidad (m):	---
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Proyecto:	-
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Material 1:	← CD-9 - Suelo Granular	Fecha:	18/09/2019
Material 2:	⇒ GCL	LSN:	Fijado
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

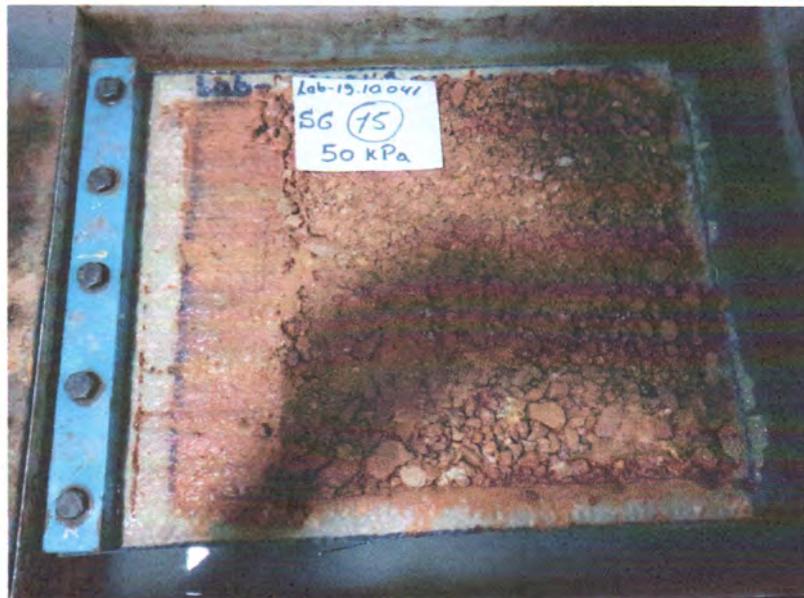
Panel Fotográfico



Carga Aplicada 100 kPa



Carga Aplicada 200 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

 Descripción: **Suelo Granular**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate:  **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1:  **CD-3**

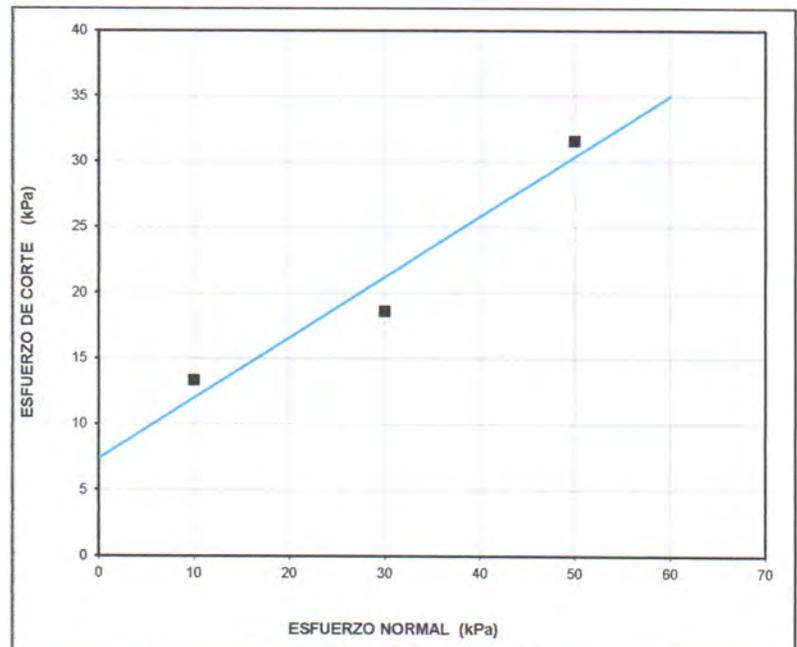
 LSN: **Fijado**

 Material 2:  **GCL**

 Substrato:  **Substrato Rígido**

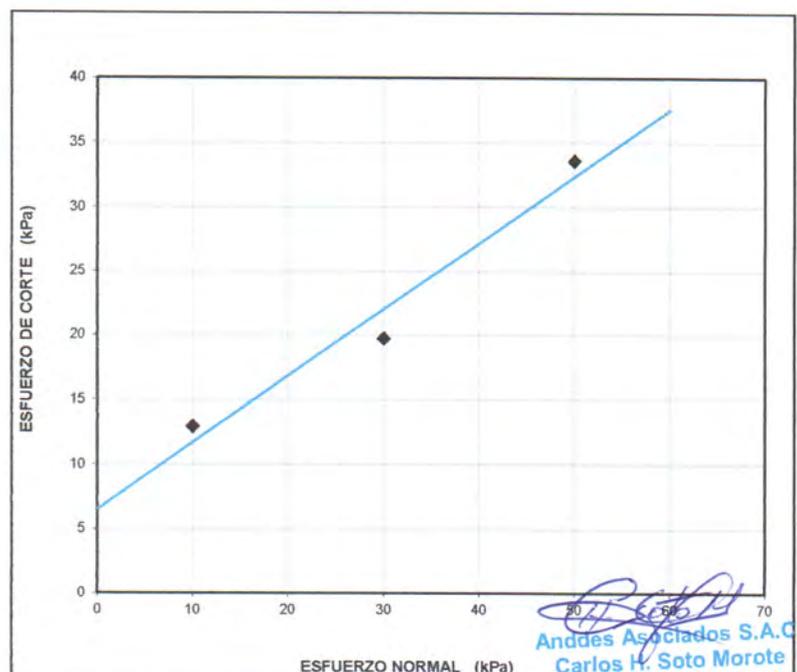
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (2.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	13,3	53
2	30,0	18,6	32
3	50,0	31,6	32
Adhesión:		7,44	kPa
Ang. Fricción:		24,7	grados
Coeficiente de Fricción:		0,43	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm de Desplazamiento)			
N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	12,9	52
2	30,0	19,7	33
3	50,0	33,6	34
Adhesion:		6,54	kPa
Ang. Fricción:		27,4	grados
Coeficiente of Fricción:		0,48	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA



Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 PIP- 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: -

Profundidad (m): ---

Descripción: **Suelo Granular**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← CD-3

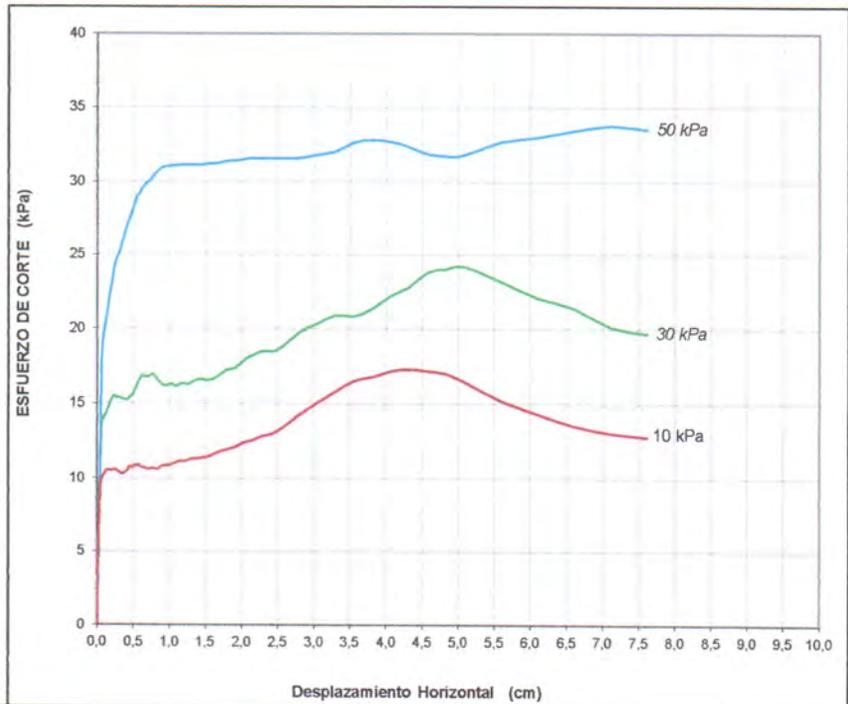
LSN: Fijado

Material 2: → GCL

Substrato: → Substrato Rígido

DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal
	kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
CD-3	
Clasificación SUCS	
GP	
Contenido de Humedad Inicial(%)	
1,60%	
Densidad Seca Inicial	
DS = 1,566 gr/cm ³	
Cont. Humedad Final (%)	
1) 12,3%	2) 11,0% 3) 10,3%

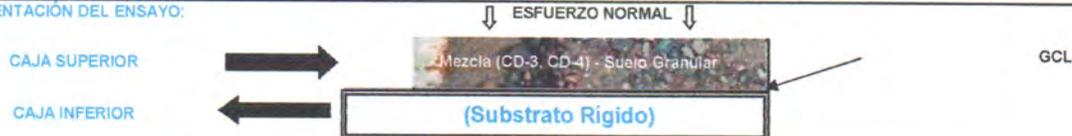


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
3. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
4. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
5. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

- 1 Cada espécimen de GCL fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
- 2 El suelo CD-3 fue colocado en la parte superior de la caja de corte en condición remoldeado según lo indicado por el cliente
- 3 Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 12.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
- 4 El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
- 5 El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y suelo granular
- 6 Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
- 7 Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

Nº de Informe: LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	-	Profundidad (m):	---
Descripción:	Suelo Granular	Nº de Proyecto:	-
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Fecha:	18/09/2019
Material 1:	← CD-3	LSN:	Fijado
Material 2:	→ GCL		
Substrato:	→ Substrato Rígido		

Panel Fotográfico



Carga Aplicada 100 kPa



Carga Aplicada 200 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

ANEXO C.4: INTERFASE GM-GCL

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: ---

Profundidad (m): ---

Descripción: **GCL + GEOMEMBRANA**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← GCL

LSN: Fijado

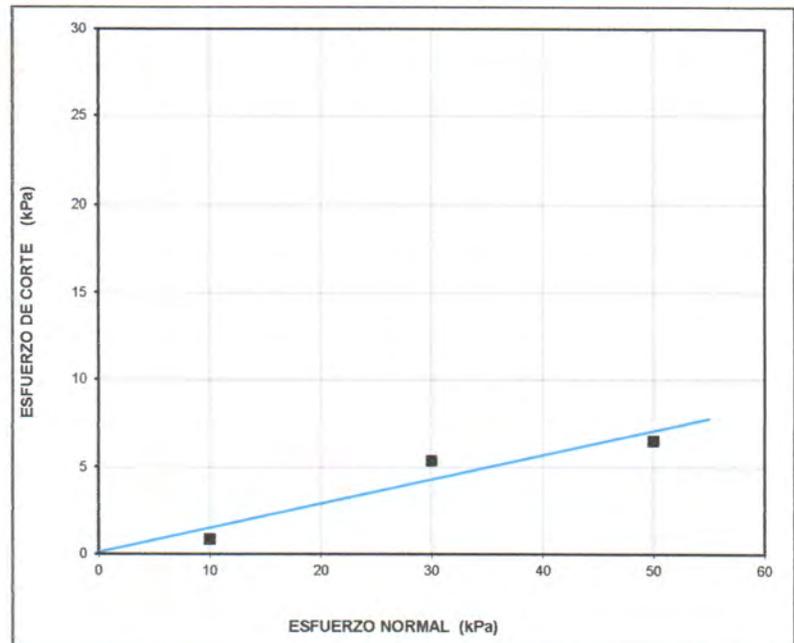
Material 2: ⇒ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: ⇒ Substrato Rígido

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (Valores Pico)			
Nº Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Angulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	0,83	5
2	30,0	5,33	10
3	50,0	6,50	7

Adhesión:	0,14	kPa
Ang. Fricción:	7,9	grados
Coefficiente de Fricción:	0,14	

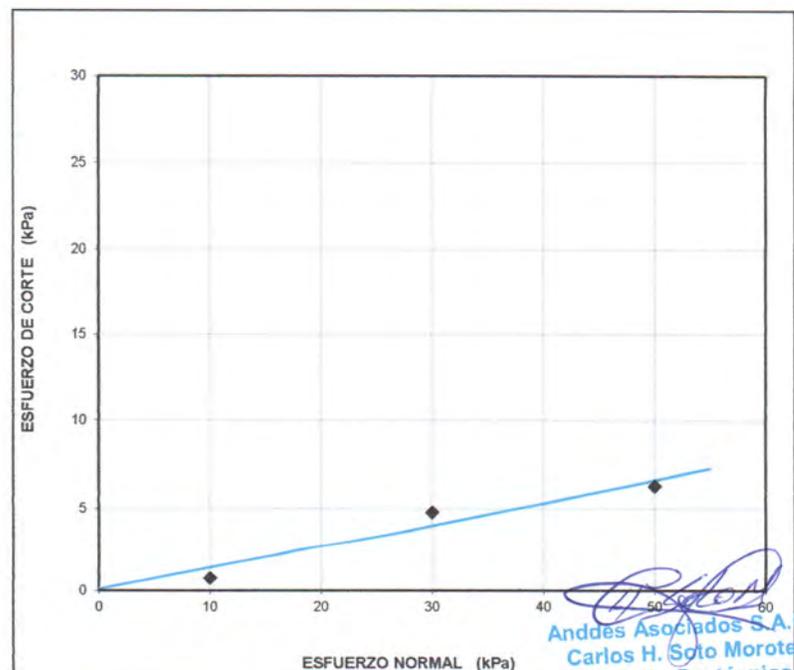
NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

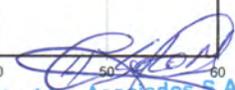


ENVOLVENTE DE ESFUERZOS (7.5 cm de Desplazamiento)			
Nº Ensayo	Est. Normal	Est. De Corte	Angulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	0,75	4
2	30,0	4,76	9
3	50,0	6,27	7

Adhesion:	0,13	kPa
Ang. Fricción:	7,4	grados
Coefficiente of Fricción:	0,13	

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA




Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP: 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

Nº de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: ---

Profundidad (m): ---

Descripción: **GCL + GEOMEMBRANA**

Nº de Proyecto: -

Solicitado Por: **Elard Quispe**

Nº de Informe: **LAB-19.10.041**

Superstrate: ← Capa de Drenaje

Fecha: **18/09/2019**

Material 1: ← GCL

LSN: Fijado

Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)

Substrato: → Substrato Rígido

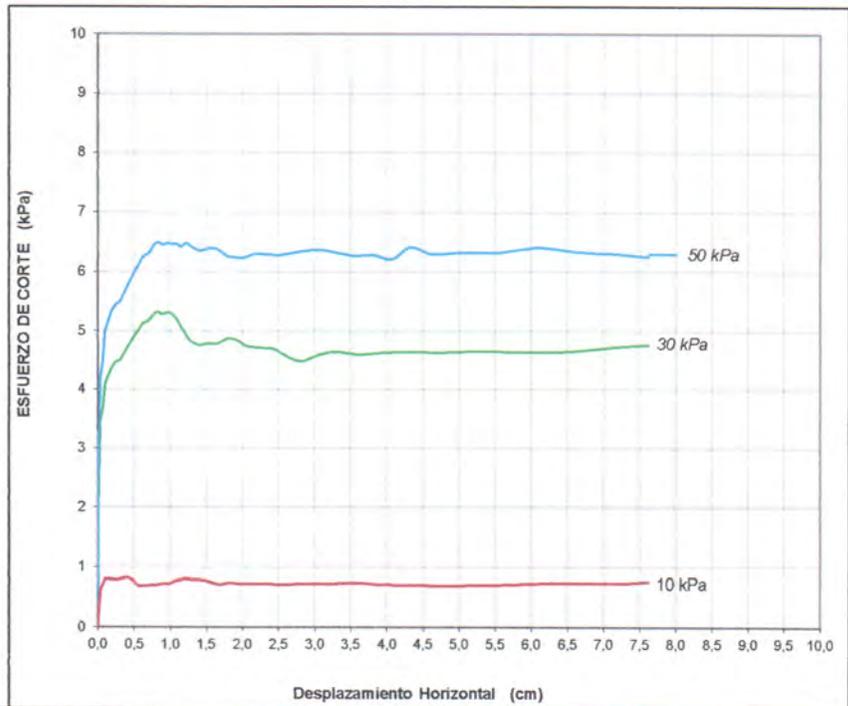
DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
GCL	
Clasificación SUCS	

Contenido de Humedad Inicial(%)	

Máxima Densidad Seca Inicial	

Cont. Humedad Final (%)	
1) ---%	2) ---% 3) ---%
4) ---%	

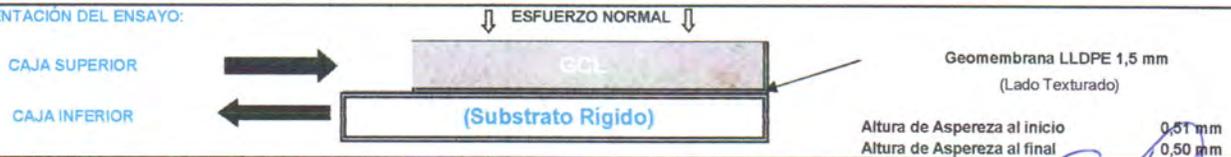


CONDICIONES ESTÁNDAR :

VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min

1. La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
2. El ensayo fue terminado después 3.00"(76mm) de desplazamiento, salvo excepciones
3. El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo
4. Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).

ORIENTACIÓN DEL ENSAYO:



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

1. Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
2. El GCL fue colocado en la parte superior de la caja de corte, según lo indicado por el cliente
5. El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y Geomembrana.
6. Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
7. Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.

Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP

Ingresado por: JCA

Revisado por: CSM

Nº de Informe: LAB-19.10.041

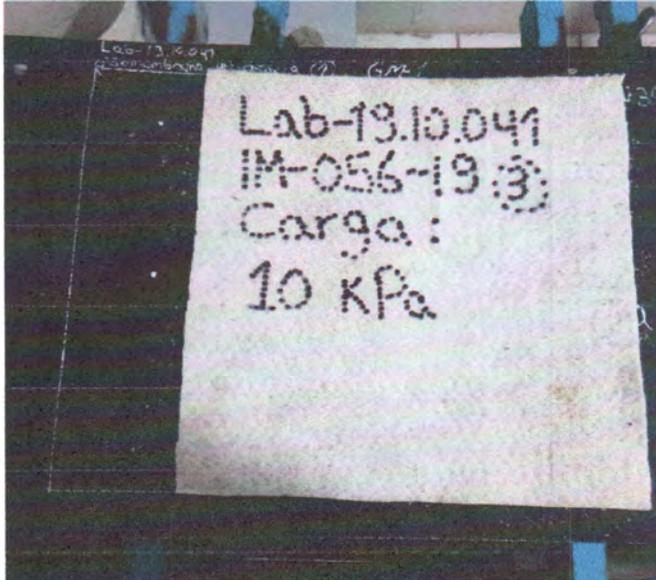
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

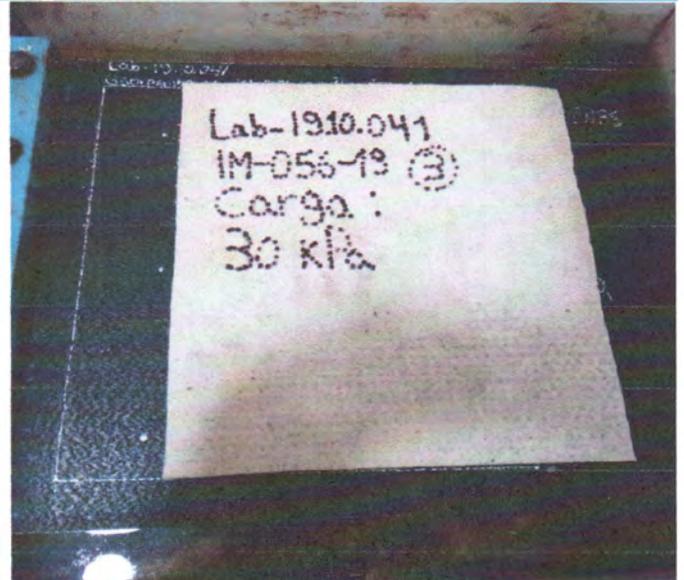
Cliente: -
Ubicación del Proyecto: -

Zona: ---	Profundidad (m): ---
Descripción: GCL + GEOMEMBRANA	Nº de Proyecto: -
Solicitado Por: Elard Quispe	Nº de Informe: LAB-19.10.041
Superstrate: ← Capa de Drenaje	Fecha: 18/09/2019
Material 1: ← GCL	LSN: Fijado
Material 2: → Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)	
Substrato: → Substrato Rígido	

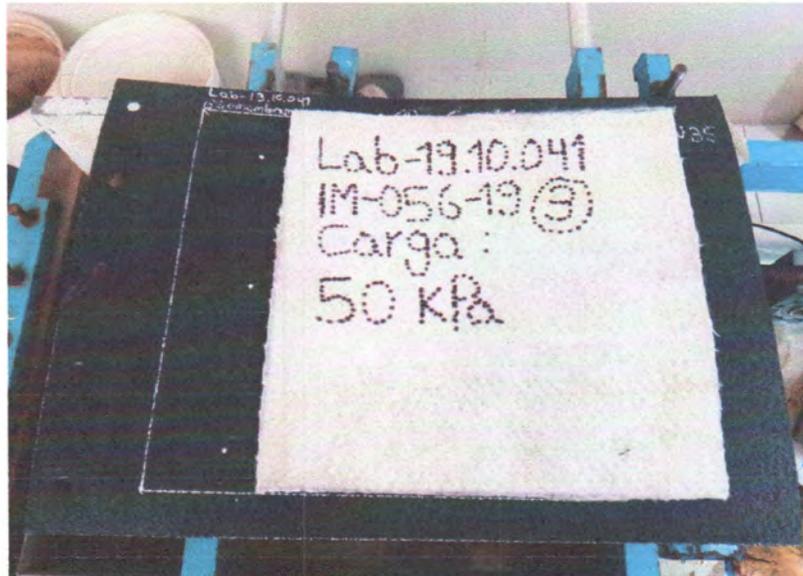
Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por: MP	Ingresado por: JCA	Revisado por: CSM	Nº de Informe: LAB-19.10.041
-------------------	--------------------	-------------------	------------------------------

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona: ---

Profundidad (m): ---

 Descripción: **GCL + GEOMEMBRANA**

N° de Proyecto: -

 Solicitado Por: **Elard Quispe**

 N° de Informe: **LAB-19.10.041**

 Superstrate: ← **Capa de Drenaje**

 Fecha: **18/09/2019**

 Material 1: ← **GCL**

LSN: Fijado

 Material 2: → **Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)**

 Substrato: → **Substrato Rígido**
ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

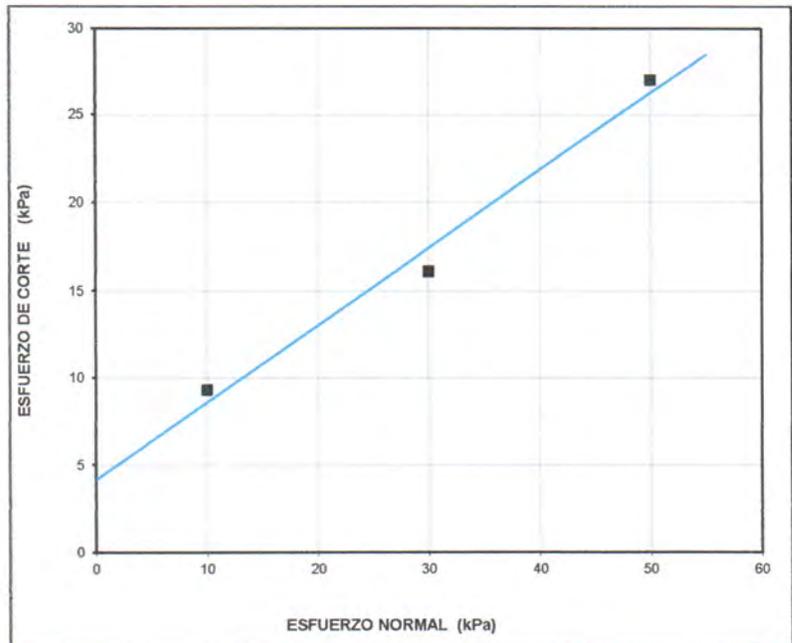
(Valores Pico)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	9,30	43
2	30,0	16,10	28
3	50,0	27,00	28

Adhesión: 4,19 kPa

Ang. Fricción: 23,8 grados

Coeficiente de Fricción: 0,42

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA

ENVOLVENTE DE ESFUERZOS

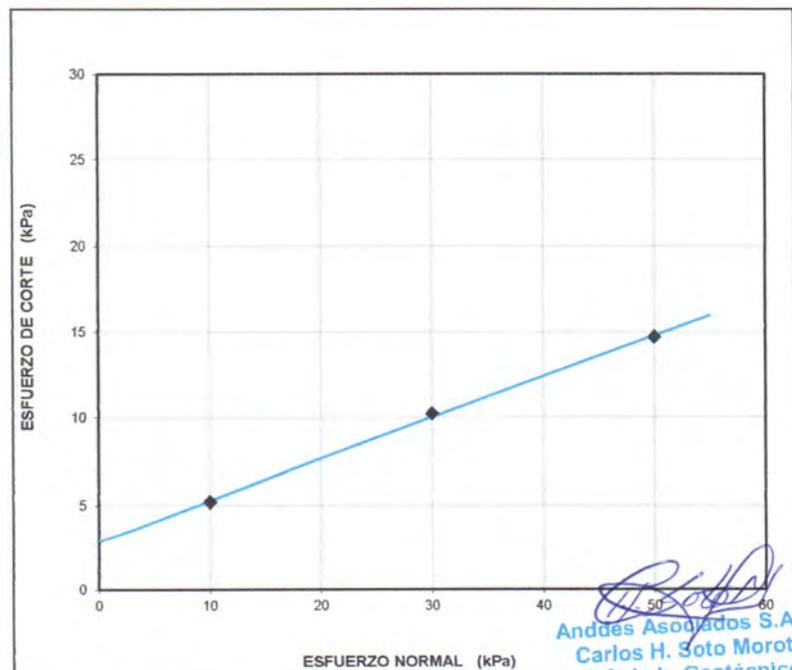
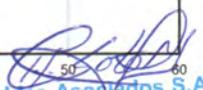
(7,5 cm. de Desplazamiento)

N° Ensayo	Esf. Normal	Esf. De Corte	Ángulo Secante de Fricción
	kPa	kPa	Grados
1	10,0	5,20	27
2	30,0	10,20	19
3	50,0	14,70	16

Adhesión: 2,91 kPa

Ang. Fricción: 13,4 grados

Coeficiente of Fricción: 0,23

NOTA: GRÁFICA SIN ESCALA


 Anddes Asociados S.A.C.
 Carlos H. Soto Morota
 Jefe Lab. Geotécnico
 CIP 87545

Realizado por:

MP

Ingresado por:

JCA

Revisado por:

CSM

N° de Informe:

LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto: **Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas**

Cliente: -

Ubicación del Proyecto: -

Zona:	---	Profundidad (m):	---
Descripción:	GCL + GEOMEMBRANA	Nº de Proyecto:	-
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Superstrate:	←←← Capa de Drenaje	Fecha:	18/09/2019
Material 1:	←←← GCL	LSN:	Fijado
Material 2:	→→→ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	→→→ Substrato Rígido		

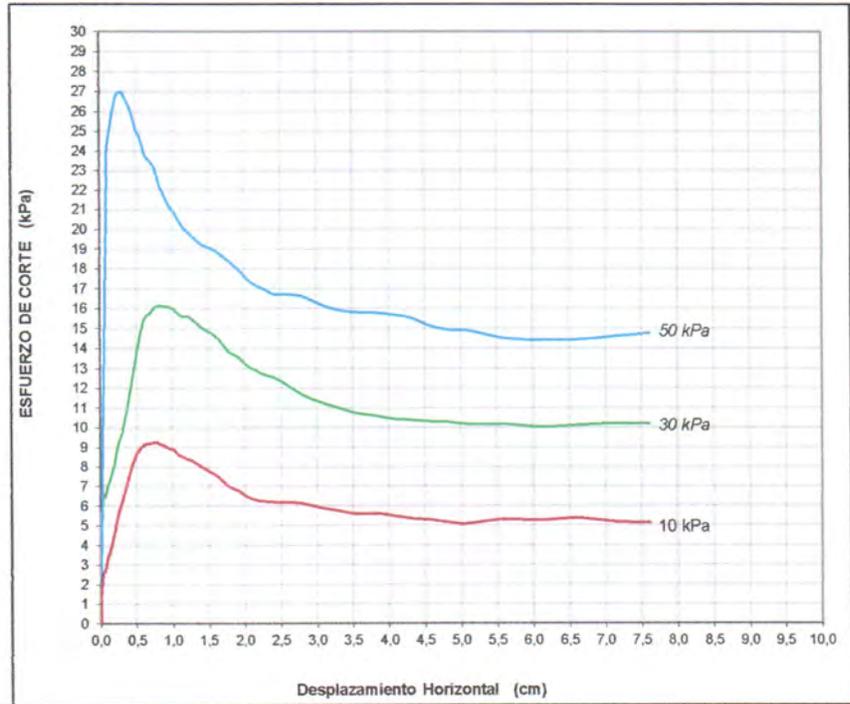
DESPLAZAMIENTO vs ESFUERZO DE CORTE	
Nº Ensayo	Esfuerzo Normal kPa
1	10,0
2	30,0
3	50,0

DATOS DE LA MUESTRA	
GCL	
Clasificación SUCS	

Contenido de Humedad Inicial (%)	

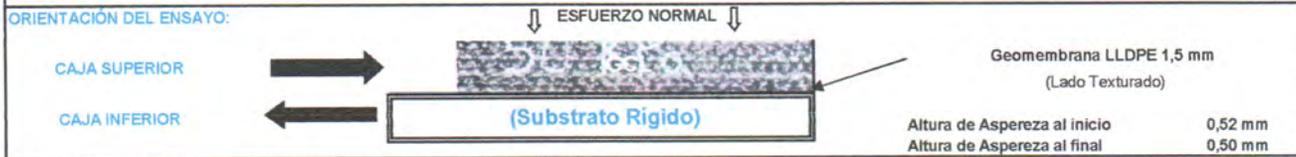
Máxima Densidad Seca Inicial	

Cont. Humedad Final (%)	
1) ---%	2) ---% 3) ---%
4) ---%	



CONDICIONES ESTÁNDAR : **VARIACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE: 0.5 mm/min**

- La separación entre cajas de corte fue de 2.0 mm.
- Los especímenes fueron saturados durante el ensayo, salvo excepciones.
- El ensayo fue terminado después 3.00' (76mm) de desplazamiento, salvo excepciones.
- El ensayo fue llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos ASTM D-5321 haciendo uso de la máquina de Corte Directo.
- Brainard-Killman LG-112 con una area efectiva de 12" x 12" (300x300 mm).



NOTAS ADICIONALES DEL ENSAYO

- Cada espécimen de geomembrana fue cortado con medidas de 14" x 20" y fijadas a la caja inferior.
- El GCL fue colocado en la parte superior de la caja de corte, según lo indicado por el cliente.
- Cada espécimen de ensayo fue consolidado por 4.0 hrs al esfuerzo normal especificado, luego es aplicado el corte.
- El ensayo fue realizado en condiciones saturadas.
- El corte ocurre en la interfase de los especímenes de GCL y Geomembrana.
- Los resultados del Ángulo de Fricción y adhesión (o Cohesión) dados, son basados en determinaciones matemáticas.
- Cualquier interpretación adicional debe ser manejada por un profesional calificado con experiencia en geosintéticos e ingeniería geotécnica.


Anddes Asociados S.A.C.
Carlos H. Soto Morote
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Realizado por: MP	Ingresado por: JCA	Revisado por: CSM	Nº de Informe: LAB-19.10.041
--------------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------------------

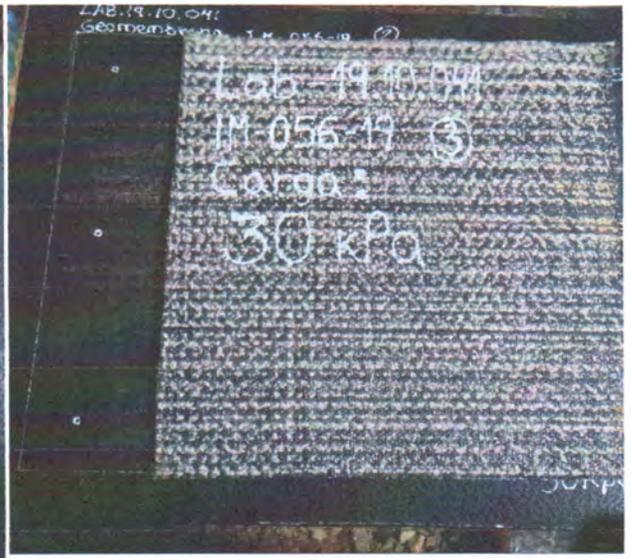
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados SAC de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Nombre del Proyecto:	Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintéticos en el cierre de minas		
Cliente:	-		
Ubicación del Proyecto:	-		
Zona:	---	Profundidad (m):	---
Descripción:	GCL + GEOMEMBRANA	Nº de Proyecto:	-
Solicitado Por:	Elard Quispe	Nº de Informe:	LAB-19.10.041
Superstrate:	← Capa de Drenaje	Fecha:	18/09/2019
Material 1:	← GCL	LSN:	Fijado
Material 2:	⇒ Geomembrana LLDPE 1,5 mm (Lado Texturado)		
Substrato:	⇒ Substrato Rígido		

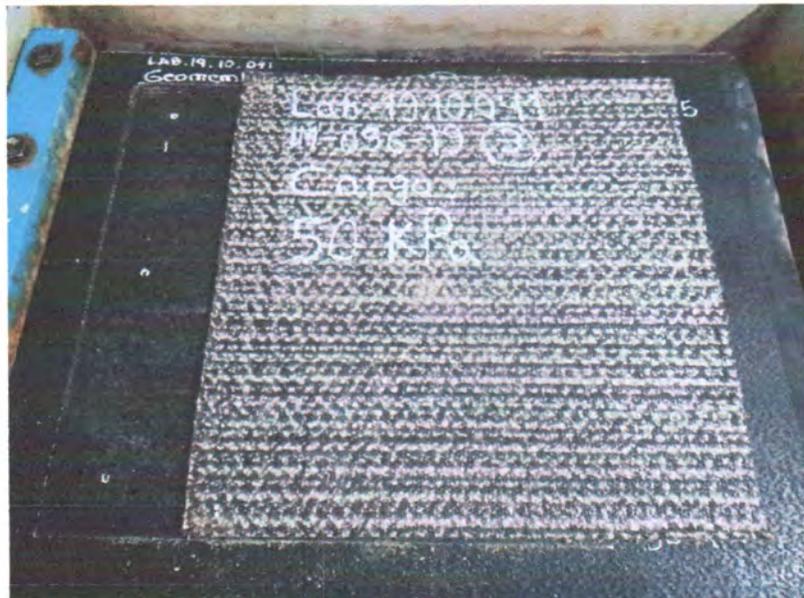
Panel Fotográfico



Carga Aplicada 10 kPa



Carga Aplicada 30 kPa



Carga Aplicada 50 kPa

Carlos H. Soto Morote
Anddes Asociados S.A.C.
Jefe Lab. Geotécnico
CIP. 87545

Observación:

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:	Nº de Informe:
MP	JCA	CSM	LAB-19.10.041

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Asociados S.A.C. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el Cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Asociados S.A.C. de cualquier reclamo que provenga del Cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.