



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

**“ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO COHESIVO
CON SUELO-CEMENTO ANTE LA ACCIÓN DE LLUVIAS EN LA
ZONA CENTRAL DE CHILE”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CONSTRUCTOR

PROFESOR GUÍA: JORGE BRAVO GONZÁLEZ

MAURICIO ANDRÉS LUCERO MEDINA

CURICÓ - CHILE

2018

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2019

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que me acompañaron y guiaron a lo largo de mi formación profesional, en especial a mi familia.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente memoria consiste en el estudio de la utilización de suelo-cemento como revestimiento de taludes para disminuir el efecto de la erosión producto del escurrimiento superficial generado por la lluvia.

La metodología de ensayo corresponde a la preparación de taludes de suelo cohesivo con distintos porcentajes de cemento (y uno sin cemento) para luego evaluar el daño que produce el escurrimiento de un caudal determinado en función de las características de la región del Maule (específicamente en Curicó).

Esta memoria se compone de 5 capítulos, siendo el primero la introducción y objetivos planteados en este estudio.

En el segundo capítulo correspondiente al marco teórico, se definen las características y propiedades de los suelos, la erosión, descripción de los taludes y técnicas de protección de estos. Además, se mencionan las características y aplicaciones del suelo-cemento en la actualidad.

El tercer capítulo es el desarrollo de este estudio, donde en base a las características y condiciones del proyecto Minimina se clasifica un suelo para mezclar con cemento, se realiza un estudio de caudales producidos por la lluvia en la zona de emplazamiento del proyecto y finalmente se describe el proceso de ejecución de los ensayos de erosión.

El cuarto capítulo corresponde al análisis de los resultados de los ensayos de erosión realizados en terreno, donde se ensayaron los taludes con caudales obtenidos para 2 y 10 años de período de retorno.

Finalmente, en el capítulo 5 se concluye que la adición de cemento mejora notablemente la capacidad de un suelo cohesivo de resistir la erosión producto del escurrimiento de agua.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Página
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	3
2.1 Sistemas de clasificación de suelos	3
2.1.1 Sistema de clasificación de suelos AASHTO	3
2.1.2 Sistema de clasificación USCS.....	4
2.2 Tipos de suelos.....	4
2.2.1 Suelos granulares.....	4
2.2.2 Suelos cohesivos.....	5
2.3.1 Hidrología de la erosión	5
2.3.2 Erosión por impacto de la lluvia	6
2.3.3 Erosión por viento	7
2.3.4 Erosión por escurrimiento superficial.....	7
2.4 Taludes	7
2.4.1 Erosión de taludes.....	8
2.4.2 Mezclas de suelo para la construcción de terraplenes	9
2.5 Técnicas de estabilización, contención y protección de taludes.....	10
2.5.1 Técnicas mecánicas	10
2.5.2 Técnicas de bioingeniería	14
2.5.3 Biotécnicas	14
2.6 Cemento	16
2.6.1 Propiedades físicas y mecánicas del cemento.....	16

2.7	Suelo-cemento.....	17
2.7.1	Suelo-cemento como material de construcción.....	17
2.7.2	Suelo-cemento como material de estabilización de caminos	19
2.7.3	Dosificaciones de suelo-cemento.....	20
2.7.4	Proyecto Minimina	22
CAPÍTULO 3: DESARROLLO.....		24
3.1	Descripción de la zona a ensayar.....	24
3.2	Clasificación del suelo de la muestra.....	25
3.2.1	Granulometría.....	26
3.2.2	Límite líquido y límite plástico.....	29
3.2.3	Clasificación según AASHTO.....	31
3.2.2	Clasificación según USCS.....	33
3.3	Estudio de los caudales producidos por la lluvia en la zona	35
3.3.1	Generalidades	35
3.3.2	Escurrimiento de aguas lluvias	35
3.3.3	Cálculo del caudal aportante de aguas lluvias.....	37
3.3.4	Período de Retorno (T).....	38
3.3.5	Tiempo de Concentración (Tc)	38
3.3.6	Precipitación máxima diaria (PD ¹⁰).....	39
3.3.7	Precipitación P_1^T	39
3.3.8	Precipitación P_t^T	40
3.3.9	Intensidad de la Lluvia de Diseño I	40
3.3.10	Caudal Aportante por Aguas Lluvias (Q)	41
3.4	Características de taludes tipo para la realización de los ensayos.....	41
3.5	Dosificaciones tentativas de suelo-cemento para realizar los ensayos en base a las muestras obtenidas	42
3.6	Descripción de ensayos en terreno.....	43

3.6.1	Preparación de taludes	43
3.6.2	Ensayos de erosión	47
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS		50
4.1	Resultados de ensayos en terreno	50
4.1.1	Ensayo para período de retorno de 2 años	50
4.1.2	Ensayo para período de retorno de 10 años	54
4.2	Resumen de resultados	56
4.3	Análisis de resultados	57
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		59
5.1	Conclusiones generales	59
5.2	Recomendaciones	59
BIBLIOGRAFÍA		61
	Manuales	61
	Normas	61
	Publicaciones	62
	Tesis de pregrado	62
	Apuntes	62
	Videos	62
ANEXOS		63
	Anexo 1: Cubicaciones	63
	Anexo 2: Tablas	64

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Contenido	Páginas
Ilustración 1: Efecto de consolidación y dispersión de las partículas de suelo.	6
Ilustración 2: Nomenclatura de taludes y laderas.	8
Ilustración 3: Talud de corte y terraplén.	8
Ilustración 4: Talud erosionado.	9
Ilustración 5: Corte de talud con maquinaria.	10
Ilustración 6: Foso y contrafoso.	11
Ilustración 7: Ejemplo de pedraplén.	12
Ilustración 8: Muro de contención de hormigón armado.	12
Ilustración 9: Talud protegido con mampostería de piedra.	13
Ilustración 10: Proyección de mortero (shotcrete) sobre talud.	13
Ilustración 11: Muro criba (cribwalls).	15
Ilustración 12: Bloques articulados con vegetación intercalada.	15
Ilustración 13: Casa de suelo-cemento compactado construida por la empresa Ramtec, Margaret River, Australia.	18
Ilustración 14: Iglesia de suelo-cemento compactado construida por la empresa Ramtec, Margaret River, Australia.	18
Ilustración 15: Curva granulométrica del material principal y de aporte para las mezclas.	21
Ilustración 16: Resistencia a compresión no confinada en suelo-cemento.	22
Ilustración 17: Ubicación Universidad de Talca.	23
Ilustración 18: Ubicación Minimina.	23
Ilustración 19 : Ubicación predio.	24
Ilustración 20: Secado de la muestra.	25
Ilustración 21: Cuarteo de la muestra seca.	26
Ilustración 22: Ensayo de límite líquido.	29
Ilustración 23: Curva de fluidez del suelo.	31

Ilustración 24: Clasificación fracción limo-arcillosa.....	33
Ilustración 25: Carta de plasticidad.....	35
Ilustración 26: Plano de planta Minimina.....	36
Ilustración 27: Corte transversal.....	41
Ilustración 28: Conformación del talud.....	44
Ilustración 29: Colocación de moldajes.....	44
Ilustración 30: Preparación de la mezcla de suelo-cemento.	45
Ilustración 31: Talud con un 12 % de cemento.....	46
Ilustración 32: Talud con suelo compactado y talud con 12 % de cemento.....	46
Ilustración 33: Taludes previo a los ensayos.	47
Ilustración 34: Medición de caudal para período de retorno de 10 años.....	48
Ilustración 35: Ensayo de erosión del talud con 12 % de cemento.	49
Ilustración 36: Profundidad de erosión del talud 1 (0 % de cemento añadido).....	50
Ilustración 37: Ancho de erosión del talud 1 (0 % de cemento añadido).....	51
Ilustración 38: Daño observado en el talud 1.	51
Ilustración 39: Daño en el talud 2 (6 % de cemento añadido).	52
Ilustración 40: Talud con 9 % de cemento al final del primer ensayo.	53
Ilustración 41: Talud con 12 % de cemento luego del primer ensayo.....	53
Ilustración 42: Resultado de ensayo de erosión para un período de retorno de 10 años.	54
Ilustración 43: Erosión en el talud 1 para 10 años de período de retorno.	55
Ilustración 44: Desprendimiento de material del talud 1.....	55
Ilustración 45: Zonas de mayor daño.	57
Ilustración 46: Corte transversal moldaje.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Páginas
Tabla 1: Tiempo de fraguado del cemento.	17
Tabla 2: Bandas granulométricas para subbase, bases y capas de rodadura.	19
Tabla 3: Cuadro recopilatorio de granulometrías recomendadas para suelo-cemento.	20
Tabla 4: Resistencia a la compresión-porcentaje de cemento.	20
Tabla 5: Serie de tamices elegidos.	26
Tabla 6: Granulometría del suelo ensayado.	28
Tabla 7: Determinación límite plástico.	30
Tabla 8: Determinación límite líquido.	30
Tabla 9: Clasificación de suelos Método AASHTO.	32
Tabla 10: Clasificación de suelos USCS.	34
Tabla 11: Coeficientes de duración y frecuencia.	39
Tabla 12: Porcentaje de cemento en función del tipo de suelo.	42
Tabla 13: Dosificaciones de suelo-cemento.	43
Tabla 14: Medición de caudal para un período de retorno de 2 años.	48
Tabla 15: Medición de caudal para un período de retorno de 10 años.	48
Tabla 16: Resumen de resultados.	56
Tabla 17: Precipitaciones máximas para 10 años de período de retorno, precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días.	64
Tabla 18: Coeficientes de duración de varias ciudades para lluvias de igual período de retorno. ...	65
Tabla 19: Coeficientes de frecuencia para lluvias de igual duración.	66

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En la actualidad, en Chile existe un gran número de carreteras y caminos construidos en laderas de cerro o sobre hondonadas. Para la construcción de estos caminos es necesario construir taludes, los cuales quedan expuestos al escurrimiento superficial de aguas lluvias, donde el principal efecto provocado por el agua en estos taludes es la erosión.

Actualmente, para proteger los taludes de la acción erosiva del agua, se deben invertir considerables sumas de dinero en la mantención de los taludes que conforman diversas obras viales, ya sea restituyendo zonas erosionadas o revistiendo los taludes con hormigón, mampostería de piedra, shotcrete, vegetación o alguna alternativa similar. Estos métodos de protección de taludes encarecen los proyectos relacionados a los caminos y carreteras, debido a que es necesario incorporar gran cantidad de material de empréstitos. Además, se debe considerar la mano de obra, maquinaria implicada y emisiones de carbono relacionadas a estos procedimientos. Es por esto por lo que se estudiará la alternativa de utilizar una mezcla de un suelo cohesivo y una fracción de cemento para proteger el talud de la erosión. Es importante considerar la falta de estudios relativos al efecto producido por el agua en taludes mejorados con suelo-cemento.

La finalidad de este trabajo es dimensionar el nivel de erosión que produce el agua en taludes mejorados con suelo-cemento y compararlo con el efecto producido en taludes sin protección.

Para simular el daño que produce la lluvia al talud mejorado con suelo-cemento, se intervendrá un terreno, donde se confeccionarán tramos de talud de suelo-cemento (con distintas dosificaciones de cemento), para compararlas con un talud del mismo tipo de suelo sin la adición de cemento.

Para la realización de la memoria, aparte de las pruebas en terreno mencionadas se acudirá a publicaciones y normativas relativas al uso de suelo-cemento en estabilización de caminos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto erosivo producido por la lluvia en taludes de suelo cohesivo mezclado con cemento en la región del Maule.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar y cuantificar los caudales producidos por la lluvia en la región del Maule aplicado a un proyecto típico de los ejecutados en la zona.
- Investigar dosificaciones tentativas de suelo-cemento para realizar los ensayos en base a muestras de suelos cohesivos de la región.
- Definir características de taludes tipo para la realización de los ensayos.
- Analizar el efecto de la adición de cemento al suelo cohesivo en cada talud midiendo el nivel de erosión producido por el agua.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Debido al alto costo de la protección de taludes, surge la necesidad de buscar alternativas más simples para la ejecución de distintos tipos de obras civiles. La utilización del suelo-cemento ya cumple otras aplicaciones desde hace ya bastante tiempo, principalmente en la estabilización de caminos y como material de construcción.

La construcción de revestimientos de taludes implica en muchas ocasiones la explotación de empréstitos alejados del lugar de ejecución de la obra, aumentando los costos y el tiempo de traslado de los materiales. En el caso de la protección con mampostería de piedra (considerada como una de las alternativas de menor costo), se requiere traer bolones que deben cumplir con varios parámetros que pueden dificultar la construcción del proyecto.

2.1 Sistemas de clasificación de suelos

Los sistemas de clasificación de suelos tienen como objetivo ordenar los suelos en grupos de similares características geotécnicas. Existen diversos sistemas de clasificación de suelos, los cuales son basados en la aptitud de un suelo con fines ingenieriles o basados en ensayos de identificación. El sistema basado en la aptitud de un suelo tiene como limitante el ser solamente útil para las aplicaciones para las cuales fue creado. Dentro del grupo basado en ensayos, algunos sólo emplean características granulométricas del suelo (y además difieren sus categorizaciones granulométricas) y otros añaden características plásticas del material (Sáez, 2010).

En Chile se utiliza en geotecnia vial el método AASHTO y en geotecnia no vial se utiliza el método de clasificación USCS.

2.1.1 Sistema de clasificación de suelos AASHTO

El sistema de clasificación de suelos AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) es utilizado por el Departamento de Caminos de Estados Unidos.

Los suelos se clasifican dentro de 8 grupos principales (desde A-1 al A-8) en base a su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los primeros tres grupos (A-1, A2 y A3)

corresponden a materiales de grano grueso y los materiales comprendidos entre los grupos A-4 y A-7 corresponde a material de grano fino. Finalmente, el grupo A-8 define suelos como lodos, turbas y otros tipos de suelos altamente orgánicos.

2.1.2 Sistema de clasificación USCS

El sistema de clasificación USCS (*United Soil Classification System*) está normado por la ASTM (*American Society of Testing Materials*) y fue propuesto originalmente para la construcción de aeropuertos.

Este sistema utiliza símbolos de dos letras para clasificar suelos, donde la primera letra corresponde al tipo de suelo y la segunda letra lo caracteriza en detalle. Este sistema permite describir más claramente los tipos de suelos.

El método USCS se basa en (Sáez, 2010):

- Criterios granulométricos:
 - Porcentaje de grava, arena y partículas finas.
 - Forma de la curva granulométrica (coeficientes de uniformidad C_U y de la curvatura C_C).
- Características plásticas I_p y w_L (carta de Casagrande).
- Contenido de materia orgánica.

2.2 **Tipos de suelos**

Los suelos se dividen en 2 grandes categorías relacionadas con la composición granulométrica del material. Estos tipos son:

2.2.1 Suelos granulares

Son suelos que tienden a ser inestables debido a que no presentan adherencia entre partículas. En este tipo de suelos, la cohesión se considera igual a cero (suelos no cohesivos). Dentro de estos suelos se

encuentran las gravas y arenas, las cuales son granos gruesos, de forma regular, con alteraciones del tipo físico-mecánicas. Las fuerzas de atracción preponderantes en este tipo de suelos son las fuerzas gravitatorias (Sáez, 2010).

2.2.2 Suelos cohesivos

Son suelos con mayor cantidad de partículas finas, que permiten que un suelo se mantenga unido. En suelos cohesivos la estructura depende del contenido de minerales arcillosos en la mezcla de suelo y de las fuerzas que actúan entre ellos, ya sea de superficie o gravitatorias. Las fuerzas de superficie se relacionan con la capa de moléculas de agua que cubre las partículas de suelo, la cual se pega a los granos por fuerzas de atracción creadas por un campo eléctrico (Sáez, 2010).

Los suelos cohesivos se caracterizan por las siguientes propiedades:

- a) **Partículas:** Proporción considerable de partículas finas, de formas irregulares y con alteraciones de carácter físico-químico.
- b) **Vínculo de las partículas con el agua:** En suelos cohesivos el vínculo de las partículas finas con el agua es fuerte y además existe influencia de la mineralogía y de la carga eléctrica.
- c) **Fuerzas de atracción:** Cargas de superficie relacionadas con la película superficial de agua que cubre las partículas de suelo.

2.3 **Erosión en suelos**

La erosión en suelos es un fenómeno relacionado a la pérdida de material o desgaste de una superficie, puede ser producida por diversos factores, donde los más importantes son el agua y el viento.

2.3.1 Hidrología de la erosión

La erosión se vincula directamente con la forma en que escurre el agua superficialmente por el terreno. La lluvia que alcanza el suelo bajo cualquier forma puede ser aglutinada en pequeñas depresiones en la superficie o infiltrar el suelo, y a la generación de flujos subsuperficiales percolando

a mayores profundidades. Cuando el suelo no es capaz de seguir almacenando agua, el exceso contribuye a los flujos superficiales, resultando en erosión por flujos superficiales.

2.3.2 Erosión por impacto de la lluvia

El efecto de las gotas de lluvia sobre las partículas de suelo se puede comprender al considerar el momentum de una gota impactando una superficie inclinada. La componente tangencial del momentum se transfiere a la superficie del suelo, siendo sólo una fracción de la componente normal transferida y el resto reflejada. El momentum transmitido por las gotas de agua provoca dos efectos, una fase de consolidación y otra donde se producen fuerzas disruptivas al dispersarse la gota en forma de chorros de agua que desplazan partículas de suelo por el aire. El efecto de consolidación y dispersión de partículas de suelos ante el impacto de una gota se puede apreciar en la ilustración 1, donde la fase “A” es el suelo previo al impacto, la fase “B” corresponde a la dispersión de las partículas del suelo luego del impacto de la gota, en la fase “C” se aprecia la consolidación del suelo al ser impactado por la gota y finalmente en la fase “D” se muestra la remoción de las partículas sueltas por parte del flujo superficial de agua (Verdugo, 2007).

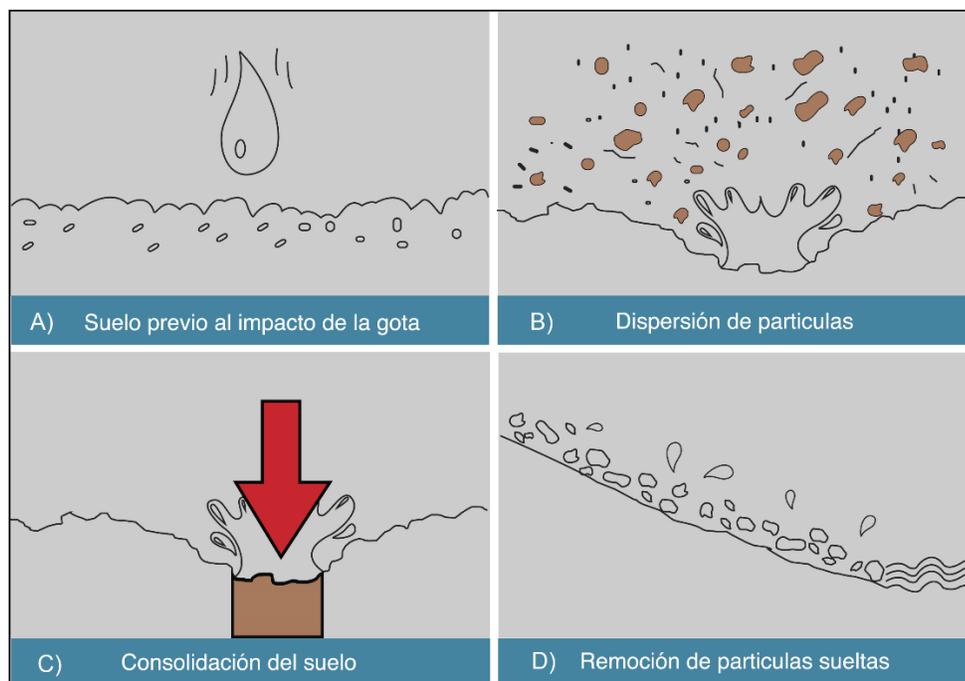


Ilustración 1: Efecto de consolidación y dispersión de las partículas de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Erosión por viento

El viento es un factor climático que puede provocar la erosión de un suelo, especialmente al actuar en conjunto con la lluvia, ya que acelera el proceso de meteorización de las rocas y además genera un efecto negativo en la vegetación del terreno.

En el caso de climas áridos y semiáridos los suelos son más susceptibles a la erosión por viento.

2.3.4 Erosión por escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial se presenta en suelos con algún grado de pendiente durante una lluvia, una vez que se ha superado el nivel máximo de infiltración (o cuando el suelo se encuentra saturado). El flujo de agua escurre como una masa de cursos de agua, interrumpida por diversas irregularidades del terreno. El factor de mayor relevancia en este tipo de erosión se relaciona a la velocidad del flujo de agua. Para que las partículas más grandes sean removidas, es necesaria una mayor fuerza y en el caso de partículas pequeñas, estas son más difíciles de erosionar producto de la cohesión presente en las arcillas.

2.4 Taludes

Un talud es una masa de tierra que posee una pendiente o inclinación en al menos uno de sus lados. Puede ser conformado naturalmente o artificialmente, donde el talud es conformado por efectos naturales como la erosión o deslizamientos naturales de tierra, y artificiales cuando el talud es construido mediante una excavación (o desmonte) o por terraplenado. En las ilustraciones 2 y 3 se puede apreciar las componentes de los taludes con su respectiva nomenclatura:

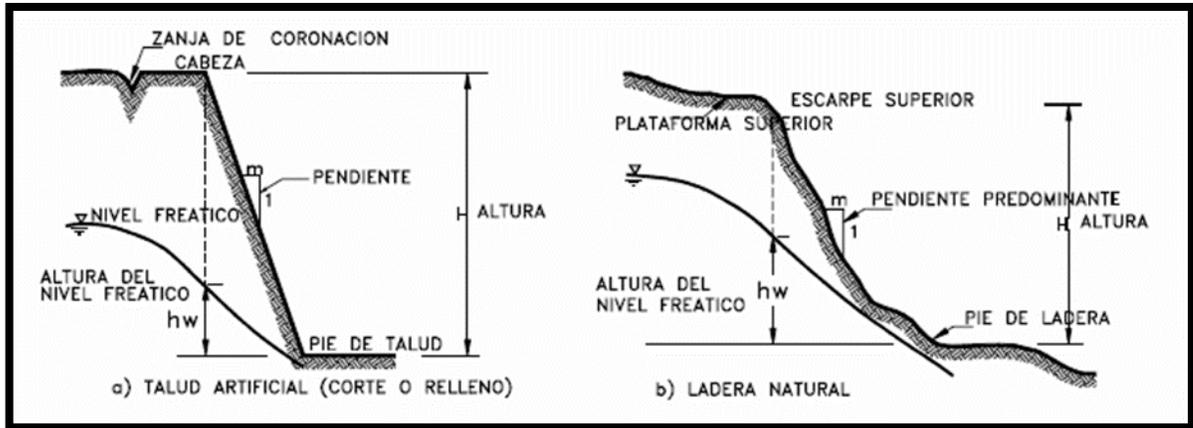


Ilustración 2: Nomenclatura de taludes y laderas.

Fuente: (John, 2011).

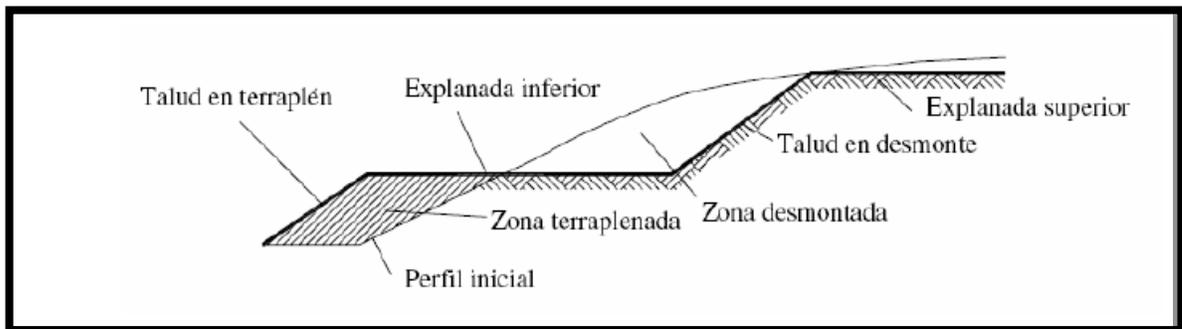


Ilustración 3: Talud de corte y terraplén.

Fuente: (John, 2011).

2.4.1 Erosión de taludes

La erosión superficial consiste en el desprendimiento de partículas individuales de suelo desde un suelo masivo y posterior transporte de dichas partículas por parte del agua o el viento.

El efecto de mayor consideración es el producido por el impacto de las gotas de lluvia, las cuales pueden provocar que las partículas de suelo sean desplazadas a algunos centímetros de distancia. El suelo también está expuesto al deterioro debido a efectos climáticos como ciclos de hielo-deshielo,

variación entre ciclos húmedos y secos y además efectos bioquímicos. En la ilustración 4 se puede apreciar un talud erosionado por el efecto de la lluvia:



Ilustración 4: Talud erosionado.

Fuente: (Verdugo, 2007).

2.4.2 Mezclas de suelo para la construcción de terraplenes

Los terraplenes deben construirse con material denominado “terreno de cualquier naturaleza” (TCN), en el cual califican los suelos que no cumplan con la definición de roca (formación geológica dura, firmemente cementada o litificada de origen natural y cuya remoción sea difícil con maquinaria). Los suelos deben ser inorgánicos, libres de material vegetal, material inadecuado, escombros, basuras, materiales congelados, terrones, trozos de roca o bolones degradables o deleznable, o trozos cementados. Los materiales a utilizar en la confección de los trabajos deben tener un poder de soporte no inferior a 10 % CBR y medido a 95 % de la DMCS (densidad máxima compactada seca).

2.5 Técnicas de estabilización, contención y protección de taludes

Los tipos de técnicas utilizadas para la estabilidad de taludes son orientados por la geometría, drenajes, contención y mejora de la resistencia del talud.

2.5.1 Técnicas mecánicas

Este tipo de técnicas se basan en el uso de materiales inertes que alteren la geometría del talud, dando un soporte mecánico. Entre este tipo de técnicas aparecen:

- a) **Excavación:** Se extrae la sección inestable del talud, ya sea reduciendo parte de la cabeza del talud (disminuyendo así la altura del talud), disminuyendo la pendiente (ver ilustración 5), excavando banqueta en la parte superior del talud o excavando completamente la masa de deslizamiento.



Ilustración 5: Corte de talud con maquinaria.

Fuente: (Camacho, 2011).

- b) **Soleras:** Consisten en elementos de dimensión vertical. En zonas urbanas cumplen la función de embellecimiento, demarcación y canalización. En zonas rurales cumplen con la función de evitar el escurrimiento del agua sobre los taludes de terraplenes altos, siendo conducida hacia obras predimensionadas.
- c) **Fosos:** Se trata de canales laterales orientados paralelamente al pie del terraplén, puede estar inmediatamente al pie si lo requiere el proyecto, no obstante, normalmente se ubica a un metro entre el pie del terraplén y el talud adyacente al foso. Los fosos deben verter a cauces preexistentes. La ubicación de los fosos puede apreciar en la zona inferior de la ilustración 6.
- d) **Contrafosos:** Se orientan al igual que los fosos, con la diferencia de que se ubican sobre la cota de coronamiento del corte. Se utilizan cuando la cantidad de agua es considerable. Los contrafosos protegen a los taludes del agua proveniente de cotas superiores. La ubicación de los contrafosos se puede apreciar en la zona inferior de la ilustración 6.

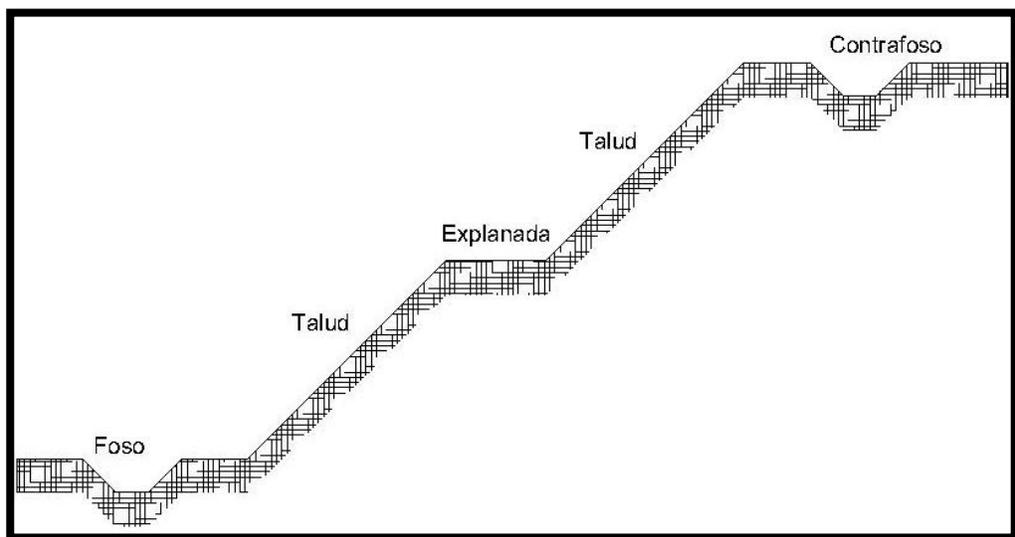


Ilustración 6: Foso y contrafoso.

Fuente: Elaboración propia.

- e) **Muros de piedra (pedraplenes):** Consiste en la excavación de parte del talud y posterior sustitución con bloques o cantos grandes de roca, colocados de forma manual o por volteo mediante maquinaria. Generalmente, el ancho de la base del pedraplén es mayor a la altura y se suele colocar geotextil en el encuentro entre la roca y el terreno natural.

También es común la utilización de un subdren, como se puede apreciar en la ilustración 7:

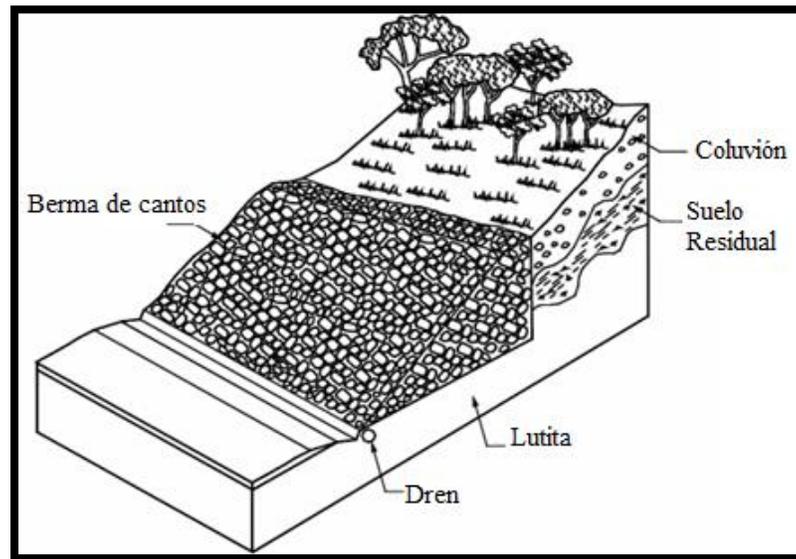


Ilustración 7: Ejemplo de pedraplén.

Fuente: (John, 2011).

- f) **Estructuras de contención:** Su función es la contención de tierras mediante la construcción de muros gravitacionales. Consisten en estructuras de hormigón simple o armado (ver ilustración 8), mampostería, mallas metálicas o tierra estabilizada mecánicamente (TEM).

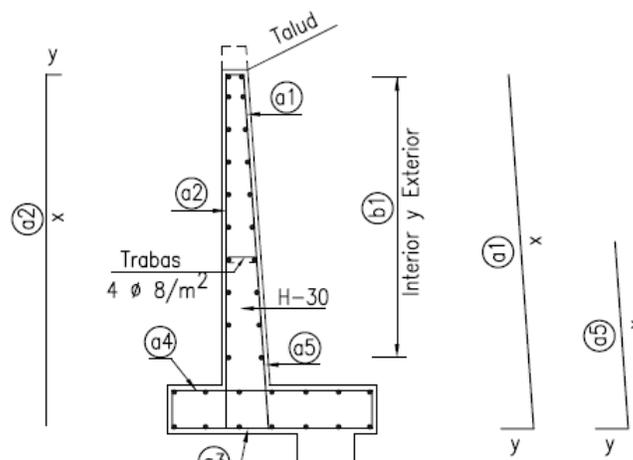


Ilustración 8: Muro de contención de hormigón armado.

Fuente: (Manual de Carreteras Vol. 4, 2017).

- g) **Mampostería de piedra:** Se refiere a la construcción de revestimientos de taludes de tierra, con piedras asentadas y unidas con mortero de cemento hidráulico, según la forma, alineamientos y dimensiones del talud (ver ilustración 9).



Ilustración 9: Talud protegido con mampostería de piedra.

Fuente: Elaboración propia.

- h) **Técnicas especiales:** Consiste en la proyección de mortero sobre el talud que se desea proteger (*shotcrete*). La ilustración 10 muestra la proyección de mortero sobre un talud:



Ilustración 10: Proyección de mortero (shotcrete) sobre talud.

Fuente: Maquinarias DPL Grout.

2.5.2 Técnicas de bioingeniería

Consisten en la utilización de materiales biológicos, entre los cuales se cuenta con materiales vegetales de tipo herbáceos, arbóreos y arbustivos. Los vegetales herbáceos se caracterizan por tener tallos delgados y tiernos sin formar un troco leñoso. Los vegetales arbóreos se caracterizan por ser plantas de mayor tamaño de tronco leñoso que se ramifica a una determinada altura respecto del suelo. El vegetal del tipo arbustivo se caracteriza por ser plantas leñosas que se ramifican desde la base. Estas técnicas buscan mejorar las condiciones físicas de los suelos que componen el talud, mediante la plantación de vegetación y aplicación de materia orgánica y fertilizantes.

Las raíces de las plantas influyen en la cohesión del suelo sobre el que se sostienen, mejorando las condiciones del talud al aumentar la resistencia del suelo a esfuerzos de corte tangencial. El entramado formado por las raíces forma una densa malla de fibras que aportan a mantener la capa superficial de suelo en su lugar, mientras que la raíz más profunda forma un anclaje que se opone a desplazamientos horizontales de mayor profundidad.

2.5.3 Biotécnicas

También llamadas técnicas mixtas, consisten en la combinación de materiales inertes y material biológico (vegetación). Dentro de estas técnicas aparecen:

- a) **Geomuros:** Se conforman de piezas modulares de concreto prefabricado con forma prismática, que se unen ortogonalmente entre sí, formando cajones. Se rellenan con un suelo seleccionado y se compacta. La siembra se realiza internamente, permitiendo ocultar el muro (ver ilustración 11).



Ilustración 11: Muro criba (cribwalls).

Fuente: (Centeno, 2002).

- b) **Muros de bloques articulados con vegetación:** Se conforman con bloques de hormigón prefabricado y se traban entre sí para luego ser rellenos con tierra (ver ilustración 12). Se tienden a inclinar para reducir las fuerzas de empuje lateral. Los bloques o bandejas se llenan de suelo para poder estabilizar el conjunto articulado y finalmente ser sembrados (Centeno, 2002).



Ilustración 12: Bloques articulados con vegetación intercalada.

Fuente: (Centeno, 2002).

2.6 Cemento

El cemento es un material pulverizado que al mezclarse con una cantidad conveniente de agua, forma una pasta conglomerante con capacidad de endurecimiento al aire o bajo agua.

Dependiendo de su composición se distinguen distintos tipos de cemento y componentes de este:

- a) **Clínquer:** Se compone mayoritariamente de silicatos cálcicos. Es el producto de calentar hasta una temperatura no inferior a la de fusión la mezcla homogénea finamente molida de óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO_2), además de una porción menor de óxidos de aluminio (Al_2O_3) y fierro (Fe_2O_3).
- b) **Cemento Portland:** Se produce de la molienda conjunta de clínquer y yeso. Se puede aceptar un 3 % de materias extrañas (excluido sulfato de calcio hidratado).
- c) **Puzolana:** Es un compuesto silíceo-aluminoso que al estar finamente molido y al interactuar con un porcentaje de agua obtiene propiedades aglomerantes.
- d) **Escoria básica granulada de alto horno:** Se obtiene al enfriar una masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro en un alto horno. Está compuesto principalmente por silicatos y sílico-aluminatos de calcio.
- e) **Cemento puzolánico:** Se produce de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso. Se puede aceptar un 3 % de materias extrañas (excluido sulfato de calcio hidratado).
- f) **Cemento siderúrgico:** Se produce mediante la molienda conjunta de clínquer, escoria granulada de alto horno y yeso. Se puede aceptar un 3 % de materias extrañas (excluido sulfato de calcio hidratado) Nch 148 (INN, 1968).

2.6.1 Propiedades físicas y mecánicas del cemento

Dentro de las propiedades físicas y mecánicas de los cementos se encuentran las que se mencionan a continuación:

- a) **Expansión en autoclave:** La expansión o contracción en autoclave será inferior a 1 %. Esta expansión se encuentra normada según la NCh 157 (INN, 1967).
- b) **Tiempo de fraguado:** El tiempo de fraguado se indica en la tabla 1, siendo este tiempo dependiente del tipo de cemento:

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo min	Final máximo h	7 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)	7 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

Tabla 1: Tiempo de fraguado del cemento.

Fuente: Nch 148 Of. 68.

- c) **Resistencia mecánica:** La resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de morteros de cemento se presentan en la tabla 1. Los procedimientos para obtener estas resistencias se determinan según la norma NCh 158, Nch 148 Of. 68.
- d) **Peso específico:** Para el cemento Portland el peso específico es igual o superior a 3,00 kg/dm³, Nch 148 Of. 68.
- e) **Otras características:** Superficie específica, finura y deformabilidad se utilizan según las normas Nch 149, Nch 150 y Nch 156 respectivamente Nch 148 Of. 68.

2.7 Suelo-cemento

El suelo-cemento es el resultado de la mezcla de un suelo, una fracción de cemento y de agua. Existen diversas aplicaciones para esta combinación de elementos que mejoran las características físicas y mecánicas de un suelo.

2.7.1 Suelo-cemento como material de construcción

En la actualidad, en algunos países, el suelo es utilizado como material de construcción al agregarse un porcentaje de cemento y agua, mezclando estos elementos y dándoles diversos usos, como fundación, pared, piso, cubierta y entrepiso, morteros, revestimiento de canales y subbase para pavimento. El suelo-cemento es una alternativa factible tanto técnica como económica para la producción de diversos elementos para la construcción de viviendas y estructuras similares.

La ejecución de muros de suelo-cemento resulta técnicamente viable en países donde las condiciones sísmicas lo permitan. Ejemplo de ello son las construcciones realizadas por la empresa Ramtec en Australia, las cuales se aprecian en las ilustraciones 13 y 14.



Ilustración 13: Casa de suelo-cemento compactado construida por la empresa Ramtec, Margaret River, Australia.

Fuente: (Barros e Imhoff, 2010).



Ilustración 14: Iglesia de suelo-cemento compactado construida por la empresa Ramtec, Margaret River, Australia.

Fuente: (Barros e Imhoff, 2010).

2.7.2 Suelo-cemento como material de estabilización de caminos

En el Manual de Carreteras se establecen las bandas granulométricas, porcentajes de cemento para la estabilización de bases con cemento y resistencias a compresión con el fin de mejorar las características de bases para pavimentos. A continuación, se describen los parámetros que deben cumplir las bases mejoradas con cemento:

- a) **Base Granular Tratada con Cemento (GTC):** Los materiales para GTC deberán cumplir con una de las siguientes bandas granulométricas: TM-50c con tamaño máximo absoluto de 40 mm o TM-25 (ver tabla 2). Los materiales podrán ser sólo seleccionados, siempre que cumplan con una resistencia característica a la compresión a 7 días de 2,5 MPa (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).
- b) **Base Tratada con Cemento (BTC):** Los materiales para BTC deberán cumplir con lo establecido en GTC a excepción de las partículas chancadas, cuyo porcentaje deberá ser mayor que 50 % y de la resistencia a la compresión, que debe ser de 4,5 MPa, con una dosis mínima de 5 % de cemento (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).

Tamiz (mm)	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70 – 100	-	100	100	100	
25	55 – 100	55 – 85	70 – 100	70 – 100	80 – 100	80 – 100	100
20	-	45 – 75	60 – 90	50 – 80	-	-	70 – 100
10	30 – 75	35 – 65	40 – 75	25 – 50	50 – 80	50 – 80	50 – 80
5	20 – 65	25 – 55	30 – 60	10 – 30	35 – 65	35 – 65	35 – 65
2.5	-	-	-	5 – 15	-	-	-
2	10 – 50	15 – 45	15 – 45	-	25 – 50	25 – 50	25 – 50
0,5	5 – 30	5 – 25	10 – 30	0 – 5	10 – 30	15 – 30	10 – 30
0,08	0 - 20	0 - 10	0 - 15	0 - 3	5 - 15	5 - 20	0 - 15

Tabla 2: Bandas granulométricas para subbase, bases y capas de rodadura.

Fuente: (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).

2.7.3 Dosificaciones de suelo-cemento

Existen diversos estudios respecto a las dosificaciones de suelo-cemento con diversos fines. Uno de ellos, realizado por Barros e Imhoff, establecen las siguientes recomendaciones granulométricas de suelo para su mejora con cemento, que se pueden observar en la tabla 3.

Autores	Recomendación	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]
Enteiche	óptimo	75	10	15
	rango	45 a 80	20 a 55	
De la Fuente	rango	55 a 80	20 a 45	
De Olarte	óptimo	70	15	15
U. de Valparaíso	rango	70 a 80	20 a 30	5 a 10
Minke	óptimo	70	30	
Walker, keable	óptimo	45-80	15 a 30	5 a 20
Krüger	óptimo	60	40	

Tabla 3: Cuadro recopilatorio de granulometrías recomendadas para suelo-cemento.

Fuente: (Barros e Imhoff, 2010).

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de las probetas se pueden observar en la tabla 4, en función del contenido de cemento con un porcentaje de agua constante del 12 %.

Determinación n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N ° Cápsula	47	46	45	44	43	42	41	40	39
% agua [%]	12	12	12	12	12	12	12	12	12
% cemento [%]	6%			8%			10%		
Peso suelo h + cápsula [gr]	6005	5956	5934	5578	5621	5580	6014	5981	5963
Peso cápsula [gr]	4028	3968	3949	3612	3641	3616	4051	4017	4019
Suelo compactado [gr]	1963	1976	1970	1956	1971	1953	1953	1955	1937
Carga máxima [kgF]	3200	3200	3100	3700	3900	3550	4400	4200	4450
Resistencia [kgF/cm²]	41,32	41,40	40,10	48,06	50,15	46,12	57,28	54,24	57,46
Resistencia promedio [kgF/cm²]	40,94			48,11			56,33		

Tabla 4: Resistencia a la compresión-porcentaje de cemento.

Fuente: (Barros e Imhoff, 2010).

Aiassa y Arrúa, enfocan su estudio en el diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes, comparando diversas técnicas de mejorar el terreno, donde una de ellas es el uso de suelo-cemento.

El material que ha sido empleado como componente principal (suelo en estado natural) corresponde a un suelo limo-arenoso color marrón oscuro cuya humedad natural es del 17 % (ASTM D-2216).

El material pasante del tamiz N.º 4 (T4) y del tamiz N.º 200 (T200) son de 99,4 % y 23,7 % respectivamente (ASTM D-422). Según el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (USCS) le corresponde la denominación SM. Como material de aporte para la confección de muestras de suelo-granular se ha empleado una arena color marrón amarillento con humedad natural del 3,1 %, con pasantes T4: 99,4 % y T200: 0 %. Su clasificación según USCS es SP. Las curvas granulométricas de estos materiales se presentan en la ilustración 15.

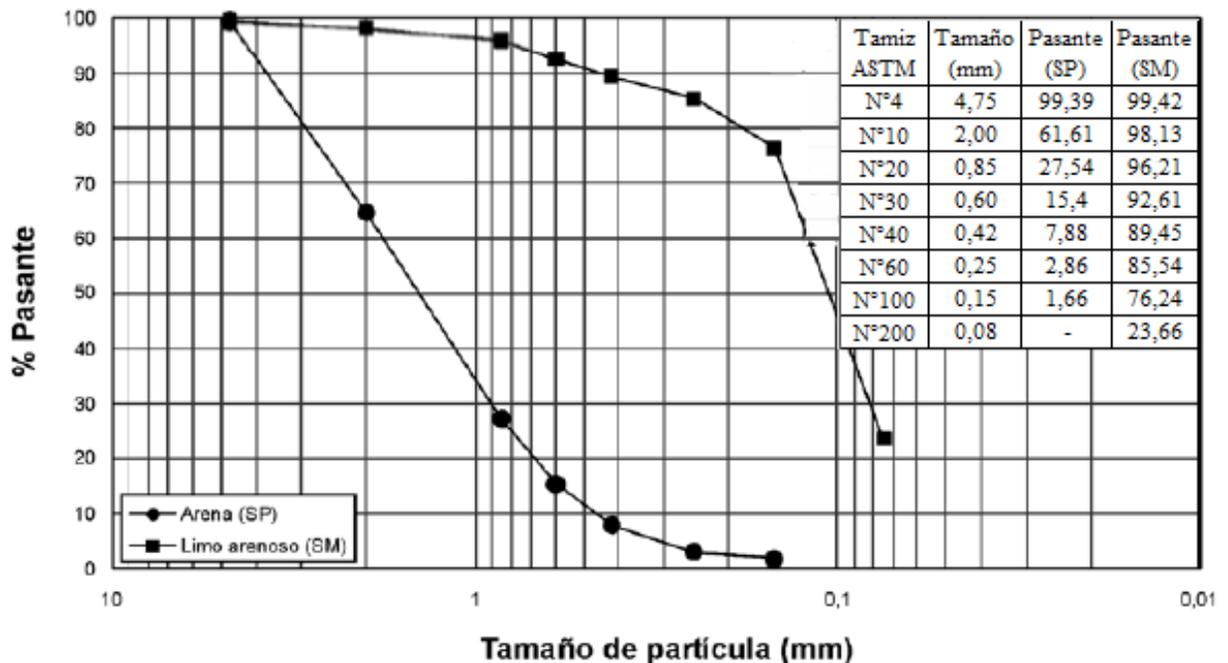


Ilustración 15: Curva granulométrica del material principal y de aporte para las mezclas.

Fuente: (Aiassa y Arrúa, 2007).

Los resultados del ensayo a compresión no confinada obtenidos por Aiassa y Arrúa se pueden observar en la ilustración 16:

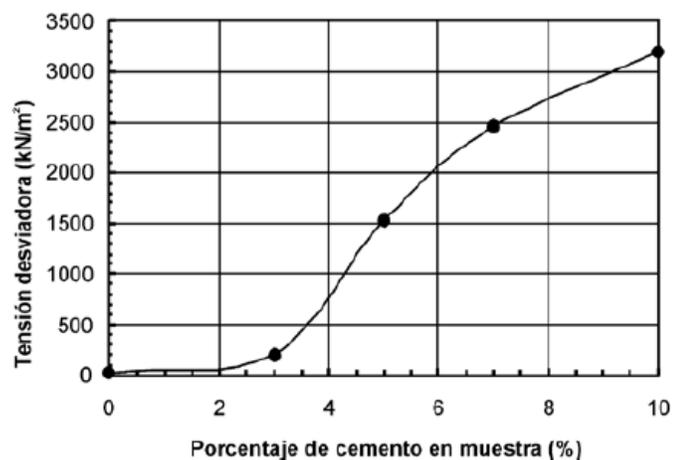


Ilustración 16: Resistencia a compresión no confinada en suelo-cemento.

Fuente: (Aiassa y Arrúa, 2007).

2.7.4 Proyecto Minimina

El Proyecto Minimina, es una obra que se espera construir en el Campus Los Niches de la Universidad de Talca (ver ilustración 17 y 18). Este proyecto pretende brindar a la escuela de Ingeniería Civil en Minas una plataforma para desarrollar diversos estudios con fines académicos. La Minimina consiste en un terraplén troncocónico de 1,5 metros de alto, 14 metros de diámetro inferior y 11 metros de diámetro superior. Esta geometría le da una pendiente del 100 % y necesita ser revestida para evitar la erosión. Como alternativa de revestimiento surge la opción del suelo-cemento, ya que se espera que tenga el aspecto de una mina, lo que descarta a la mayoría de las técnicas de protección de taludes. Otra característica de este proyecto es que se cuenta con un suelo cohesivo en el lugar donde se proyecta la obra.



Ilustración 17: Ubicación Universidad de Talca.

Fuente: Google Maps.

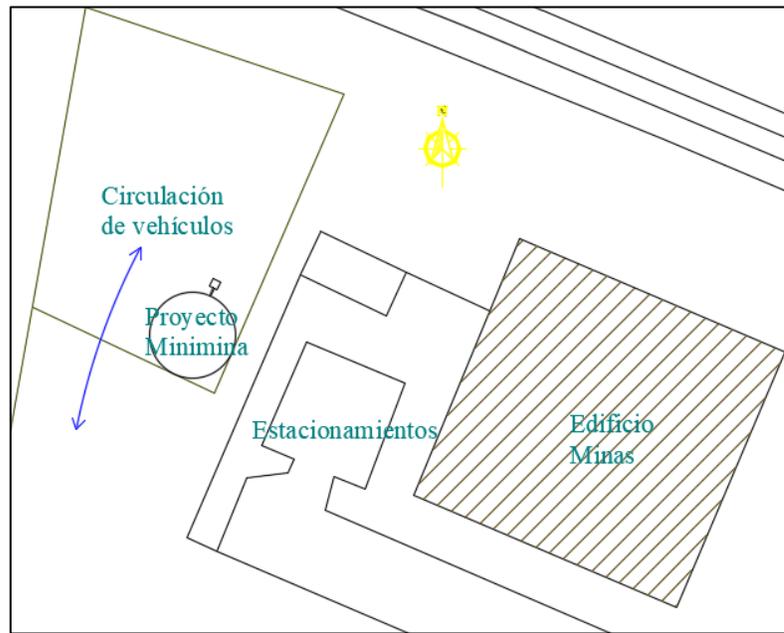


Ilustración 18: Ubicación Minimina.

Fuente: Planos del proyecto Minimina otorgados por el profesor Jorge Bravo González.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO

3.1 Descripción de la zona a ensayar

La zona donde se ejecutaron los ensayos se encuentra ubicada en la comuna de Romeral, ruta J-521, Región del Maule, Chile (ver ilustración 19).

El lugar corresponde a un predio frutícola donde se dispone de una sala de bombeo con la cual se extrae un caudal de agua determinado para la ejecución de ensayos, además de contar con el espacio suficiente para construir los taludes. En el predio existe una plantación de cerezos, que cuenta con un sistema de riego tecnificado, el cual permite la extracción de agua en puntos específicos. El lugar seleccionado para la construcción de los taludes se encuentra próximo a una llave del sistema de riego y, además, cuenta con pequeños terraplenes donde se plantaron nuevos cerezos, por tanto, la intervención en el predio es mínima.



Ilustración 19 : Ubicación predio.

Fuente: *Google Maps.*

3.2 Clasificación del suelo de la muestra

Se extrajo una muestra de un suelo de los terrenos de la Universidad de Talca, Campus Los Niches, para posteriormente ser mejorado con cemento. La muestra procede de la excavación para la fundación del edificio de Ingeniería Civil Eléctrica de la Universidad. Esto en el marco del proyecto Minimina, donde se planea utilizar este suelo para la construcción de una mina a escala para diversos estudios.

Del acopio del material de excavación se retiró una muestra de suelo de 40 kg aproximados y posteriormente se lleva al laboratorio, donde se homogenizó el suelo en estado húmedo, para luego ser reducido por cuarteo. A continuación, se redujeron los terrones y se separó el material fino de la grava y arena. La muestra se secó en un horno provisto de circulación de aire a 60 ± 5 ° C debido a la ligera presencia de material orgánico (ver ilustración 20).



Ilustración 20: Secado de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez secada la muestra, se realizó nuevamente una reducción por cuarteo de la muestra (ver ilustración 21).



Ilustración 21: Cuarteo de la muestra seca.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Granulometría

El procedimiento utilizado corresponde al señalado en el método 8.102.1: Suelos; método para determinar la granulometría (Manual de carreteras Vol. 8, 2017). Los tamices utilizados se señalan en la tabla 5.

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
80	(3")
63	(2 ½")
50	(2")
40	(1 ½")
25	(1")
20	(¾")
10	(⅜")
5	(N° 4)
2	(N° 10)
0,5	(N° 40)
0,08	(N° 200)

Tabla 5: Serie de tamices elegidos.

Fuente: (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).

Datos obtenidos en laboratorio:

- Peso de la muestra total seca a tamizar (Z): 6.969,1 gramos.
- Fracción sobre malla nominal 5 mm:
 - Peso seco inicial retenido en 5 mm (D): 594,4 gramos.
 - Peso seco lavado retenido en 5 mm (D'): 557,6 gramos.
- Fracción bajo malla nominal 5 mm.
 - Peso seco inicial que pasa 5 mm (C): 6.374,7 gramos.
 - Peso seco cuarteo que pasa 5 mm (C'): 500,0 gramos.
 - Peso seco cuarteo lavado 5 mm (C''): 327,6 gramos.

Para el cálculo del porcentaje retenido en el tamiz i de material sobre 5 mm nominal se utiliza la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{M_i}{C + D} \times 100 (\%)$$

Donde:

M_i : Masa retenida en el tamiz i del material sobre 5 mm.

C : Masa de la fracción bajo 5 mm.

D : Masa de la fracción sobre 5 mm.

Para el cálculo del porcentaje retenido en el tamiz i del material bajo 5 mm nominal, se acude a la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{C \times M_i}{C'(C + D)} \times 100 (\%)$$

Donde:

C : Masa de la fracción bajo 5 mm.

M_i : Masa retenida en el tamiz i del material sobre 5 mm.

C' : Masa de muestra reducida por cuarteo de la fracción bajo 5 mm.

D : Masa de la fracción sobre 5 mm.

Ejemplos de cálculo:

Para el cálculo del porcentaje retenido en el tamiz de 1" (25 mm de abertura nominal):

$$R_i = \frac{30,0}{6.374,7 + 594,4} \times 100 (\%) = 0,43 \%$$

Para el cálculo del porcentaje retenido en el tamiz de N ° 200 (0,08 mm de abertura):

$$R_i = \frac{6.374,7 \times 127,0}{500,0 \times (6.374,7 + 594,4)} \times 100 (\%) = 23,23 \%$$

Desarrollando el mismo procedimiento expuesto anteriormente, se completa la tabla 6:

Abertura mm	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (g)	(%)	
150	6"			
100	4"			
80	3"			
63	2 1/2"			
50	2"			
40	1 1/2"	-	-	100,00
25	1"	30,00	0,43	99,57
20	3/4"	54,30	0,78	98,79
12,5	1/2"	-	-	
10	3/8"	283,50	4,07	94,72
5	N°4	212,10	3,04	91,68
Residuo		6,00	0,08	91,60
2	N°10	25,90	4,74	86,86
0,5	N°40	168,20	30,77	56,09
0,08	N°200	127,00	23,23	32,86
Residuo		7,30	1,34	31,52

Tabla 6: Granulometría del suelo ensayado.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Límite líquido y límite plástico

El procedimiento utilizado corresponde al señalado en el método 8.102.3: Suelos; método para determinar el límite líquido y 8.102.4: Suelos; método para determinar el límite plástico (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).

Para el límite líquido y límite plástico se separó una muestra de 500 gramos de material bajo el tamiz de 0,5 mm nominal (N ° 40). En la ilustración 22 se muestra parte del procedimiento de ensaye para el límite líquido, donde se enrasa y nivela la masa de suelo para proceder con los golpes a la cuchara (girando la manivela a con una frecuencia de dos golpes por segundo).



Ilustración 22: Ensayo de límite líquido.

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 7 y 8, se pueden apreciar los valores registrados en la ficha de ensaye para la determinación del límite plástico (LP) y el límite líquido (LL) respectivamente.

Para el límite plástico se obtuvo un valor promedio aproximado de 18 %, como se puede apreciar en la tabla 7. El límite líquido arrojó un valor del 29 %, porcentaje que se obtiene de la ilustración 23, que corresponde a la intersección entre los 25 golpes (en el eje x) y la recta trazada en función del porcentaje de humedad y el número de golpe para las cinco mediciones.

		LÍMITE PLÁSTICO		
ENSAYE N°		1	2	3
CÁPSULA N°		6	1	14
NÚMERO DE GOLPES		-	-	-
1	PESO CÁPSULA + SUELO HUM. (g)	33,4	30,1	30,2
2	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	32,3	29,3	29,4
3	PESO DE LA CÁPSULA (g)	26	25	25,1
4	PESO DEL AGUA (1-2) (g)	1,1	0,8	0,8
5	PESO DEL SUELO SECO (2-3) (g)	6,3	4,3	4,3
6	HUMEDAD (4/5)*100 (%)	17,46	18,60	18,60
7	PROMEDIO LÍMITE PLÁSTICO (%)	18		

Tabla 7: Determinación límite plástico

Fuente: (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).

		LÍMITE LÍQUIDO				
ENSAYE N°		1	2	3	4	5
CÁPSULA N°		5	2	7	12	8
NÚMERO DE GOLPES		20	22	23	24	28
1	PESO CÁPSULA + SUELO HUM. (g)	35,4	37,8	37,1	37,5	37,8
2	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	32,6	34,8	34,5	34,6	35
3	PESO DE LA CÁPSULA (g)	23,4	24,8	25,8	24,8	25,2
4	PESO DEL AGUA (1-2) (g)	2,8	3	2,6	2,9	2,8
5	PESO DEL SUELO SECO (2-3) (g)	9,2	10	8,7	9,8	9,8
6	HUMEDAD (4/5)*100 (%)	30,43	30,00	29,89	29,59	28,57

Tabla 8: Determinación límite líquido.

Fuente: (Manual de Carreteras Vol. 8, 2017).

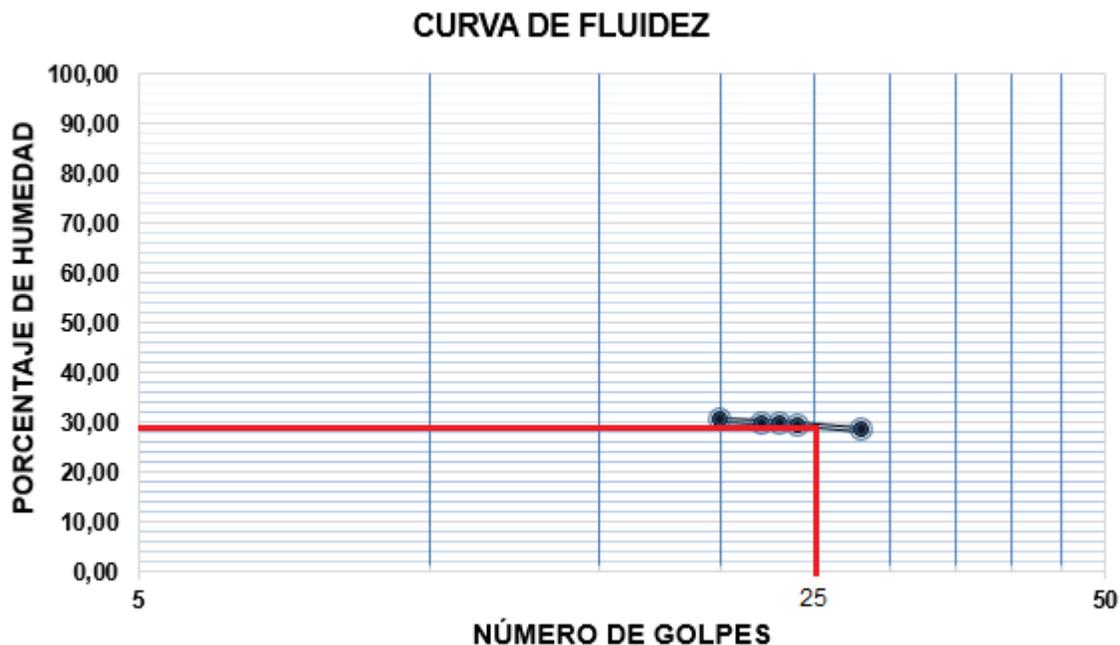


Ilustración 23: Curva de fluides del suelo.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Clasificación según AASHTO

Para la clasificación de suelos mediante el método de la AASHTO, se acude a la tabla 9, donde se obtiene el tipo de suelo en función de la granulometría, límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP). Para el caso en estudio, el suelo se clasificó como A-2-6 debido a que el porcentaje de suelo que pasa por el tamiz N ° 200 es menor a 35 %, cuenta con un límite líquido menor a 40 e índice de plasticidad mayor a 11. Por lo mencionado anteriormente, se cuenta con un suelo que se constituye principalmente de gravas o arena arcillosa o limosa.

Clasificación	Materiales granulares (35 % o menos pasa por el tamiz N° 200)							Materiales limoso arcilloso (más del 35 % pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Porcentaje que pasa:											
N° 10 (2mm)	50 máx	-	-		-			-			
N° 40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 mín		-			-			
N° 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx		35 máx			36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											(2)
Límite líquido	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				
(1):	No plástico										
(2):	El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30										
	El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30										

Tabla 9: Clasificación de suelos Método AASHTO.

Fuente: (AASHTO M-145-91, 2017).

El índice de grupo se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$IG = 0,01(\%_{200} - 15) \times (IP - 10)$$

$$IG = 0,01(32,86 - 15) \times (11 - 10)$$

$$IG = 0,18$$

Así se obtuvo que el índice de grupo resultante para este suelo es cero.

En la ilustración 24, se muestra la clasificación de la fracción limo-arcillosa según la AASHTO, la cual permite identificar el tipo de suelo en función de las características plásticas del material. Al graficar en el ábaco de Casagrande (en función del índice de plasticidad y el límite líquido), se obtuvo que el suelo se clasifica como A-2-6.

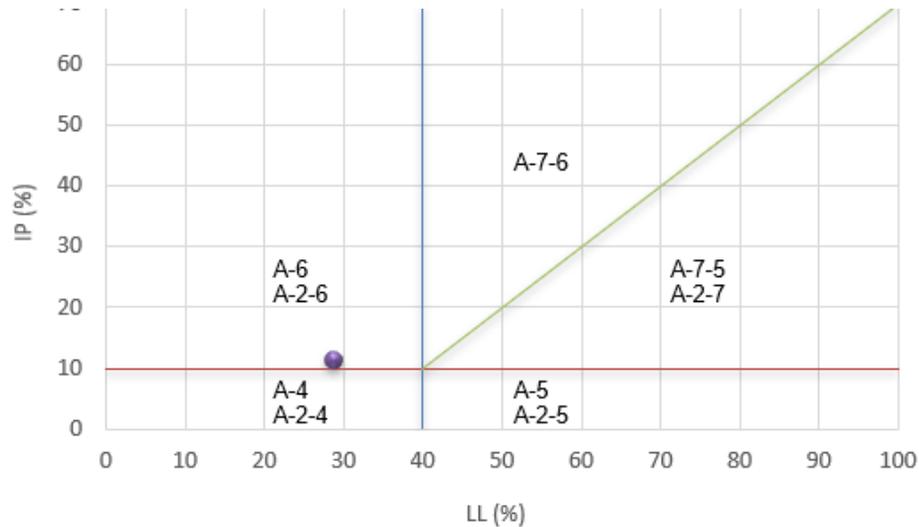


Ilustración 24: Clasificación fracción limo-arcillosa.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Clasificación según USCS

Al acudir a la tabla 10, elaborada en base a la tabla 1 de la norma ASTM D 2487-06, se clasifica el suelo en función de su granulometría y características plásticas. El primer paso fue verificar el porcentaje retenido en el tamiz N ° 200; en este caso, quedó más de la mitad retenido (ver tabla 6). Luego, más de la mitad de la muestra pasó por el tamiz N ° 4 (pasa el 91,68 %). El suelo cumple con la condición de que más del 12 % pasa el tamiz N ° 40 (suelo fino), ya que pasó el 56,09 %. Finalmente, al acudir a la carta de plasticidad del suelo, se pueden graficar los límites de Atterberg sobre la línea A y con un índice de plasticidad de 11 % (ver ilustración 25). Por esto, el suelo se clasifica como SC (arena arcillosa).

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3	
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$.	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3	
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.	
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$.	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.	

Tabla 10: Clasificación de suelos USCS.

Fuente: (ASTM D 2487, 2006).

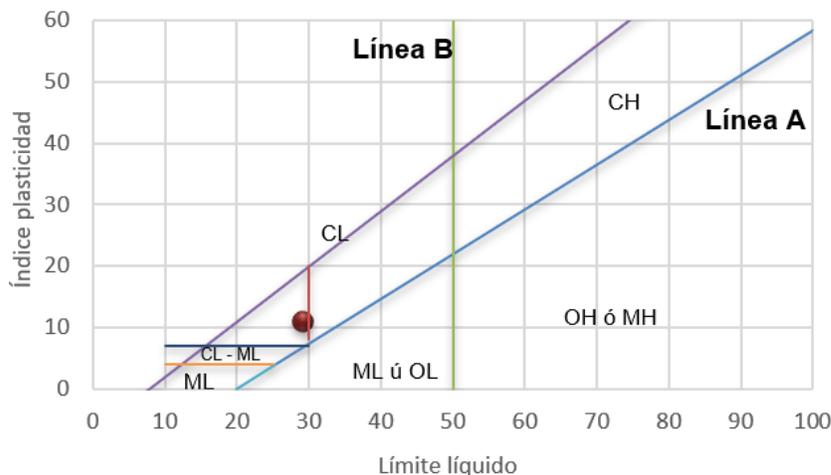


Ilustración 25: Carta de plasticidad.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Estudio de los caudales producidos por la lluvia en la zona

3.3.1 Generalidades

Los siguientes cálculos son aplicables al Proyecto Minimina, proyectado para ser construido en la Universidad de Talca, Campus Los Niches, Curicó y tiene como objetivo principal la determinación de los caudales de aguas lluvias que se generarán sobre el talud de dicho proyecto. Para el cálculo del caudal, se acude a la *Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructura de aguas lluvias* de 2005.

3.3.2 Escorrentamiento de aguas lluvias

El área aportante será la correspondiente al talud del proyecto (es el área comprendida entre la circunferencia de mayor tamaño y la segunda mayor de la ilustración 26). La parte superior no se considera, debido a que esta cuenta con un sistema de drenaje propio. La pendiente del proyecto es de 45° o de un 100 %.

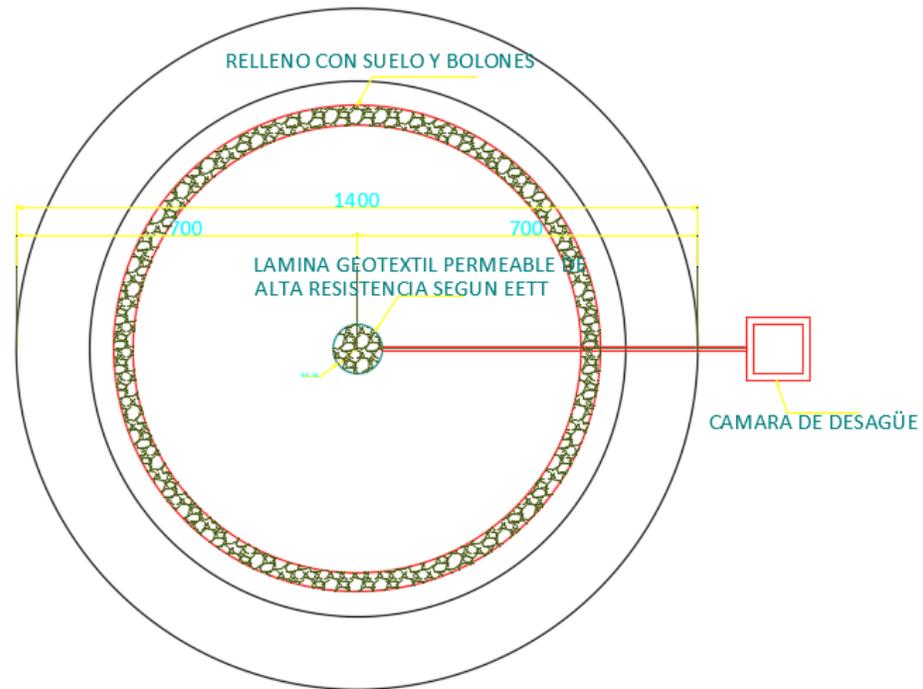


Ilustración 26: Plano de planta Minimina.

Fuente: Planos del proyecto Minimina otorgados por el profesor Jorge Bravo González.

El área por considerar se calculó de la siguiente manera:

$$A = \pi \cdot (R + r) \cdot G$$

Donde:

R : Radio mayor.

r : Radio menor.

G : Generatriz.

La generatriz se calculó como:

$$G = \sqrt{\text{cateto}_1^2 + \text{cateto}_2^2} = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2} = 2,12 \text{ m}$$

Por lo tanto, el área es:

$$A = \pi \cdot (14 + 11) \cdot 2,12 = 166,50 \text{ m}^2$$

3.3.3 Cálculo del caudal aportante de aguas lluvias

Para obtener el caudal de aguas lluvias provocadas por proyecto, se aplicó el método racional.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6}$$

Donde:

Q : Caudal máximo para un determinado período de retorno T en m³/s.

C : Coeficiente de escorrentía.

I : Intensidad de la lluvia de diseño en mm/hr.

A : Área aportante del loteo o cuenca en km².

La intensidad de la lluvia se determinó con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P_t^T}{D}$$

Donde:

I : Intensidad de lluvia asociada a un período de retorno T y de duración d, en mm/hr.

P_t^T : Lluvia o precipitación asociada a un período de retorno T y duración t, en mm.

D : Duración, en horas.

Para el cálculo de la Precipitación P_t^T, se recurre a la Fórmula de Bell (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996), donde la precipitación de duración t, entre 5 y 120 minutos, y período de retorno T, entre 2 y 100 años, se puede estimar en base a la precipitación de una hora y 10 años de período de retorno, como:

$$P_t^T = (0,21 \cdot \ln(T) + 0,52) \cdot (0,54 \cdot t^{0,25} - 0,50) \cdot P_{60}^{10}$$

Donde:

P_t^T : Lluvia en mm de duración t minutos y T años de período de retorno.

T : Período de retorno en años.

t : Duración de la lluvia en minutos.

P_{60}^{10} : Precipitación con 10 años de período de retorno y duración de 1 hora.

En que:

$$P_D^T = K \cdot CF^T \cdot CD_D \cdot PD^{10}$$

Donde:

K : Coeficiente de corrección para lluvia máxima, se adopta un valor de $K=1,1$ (que considera la lluvia absoluta).

PD^{10} : Precipitación máxima diaria (en milímetros) para un período de retorno 10 años.

CD_D : Coeficiente de duración; depende del período de retorno de lluvias entre 1 hora y 24 horas.

CF^T : Coeficiente de frecuencia para un período de retorno de T años.

3.3.4 Período de Retorno (T)

Se consideraron tres períodos de retorno: $T = 2$ años, $T = 10$ años y $T = 100$ años.

3.3.5 Tiempo de Concentración (Tc)

Se calculó mediante la siguiente fórmula (Federal Aviation Agency), debido a que es la que arroja un valor coherente y aceptable para el talud estudiado. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996).

$$Tc = 3,26(1,1 - C) \cdot \frac{L^{0,5}}{S_1^{0,333}}$$

Donde:

Tc : Tiempo de concentración de la lluvia, en minutos.

C : Coeficiente de escorrentía.

L_1 : Longitud de escurrimiento superficial en metros.

S_1 : Pendiente en porcentaje.

Luego:

$$Tc = 3,26(1,1 - 0,25) \cdot \frac{2,12^{0,5}}{100^{0,333}}$$

$$Tc = 0,87 \text{ minutos}$$

3.3.6 Precipitación máxima diaria (PD^{10})

El proyecto Minimina se ubicó en la comuna de Curicó, donde la precipitación máxima diaria es de 113,6 mm., esta precipitación corresponde al valor máximo en 24 horas para un período de retorno de 10 años. cifra que se obtiene de la tabla 17 de los anexos (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996).

3.3.7 Precipitación P_1^T

La precipitación de 1 hora se calculó para los períodos de retorno mencionados. Los valores de los coeficientes de duración (CD_D) y de frecuencia (CF^T) se expresan en la tabla 11 y se adoptaron de la Tabla 18 y de la Tabla 19 de los anexos.

Descripción	Período de Retorno (T)		
	2 años	10 años	100 años
PD^{10} (mm)	113,6	113,6	113,6
CD_D	0,12	0,12	0,12
CF^T	0,62	1	1,48

Tabla 11: Coeficientes de duración y frecuencia.

Fuente: (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996).

Por tanto, el valor de P_1^T es:

$$P_1^{T=2\text{años}} = 1,1 \cdot 113,6 \cdot 0,12 \cdot 0,62 = 9,30 \text{ mm}$$

$$P_1^{T=10\text{años}} = 1,1 \cdot 113,6 \cdot 0,12 \cdot 1 = 15,00 \text{ mm}$$

$$P_1^{T=100\text{años}} = 1,1 \cdot 113,6 \cdot 0,12 \cdot 1,48 = 22,19 \text{ mm}$$

3.3.8 Precipitación P_t^T

Dado que se consideraron intensidades de lluvias de duraciones inferiores a 2 horas, se utilizó la fórmula de Bell para la precipitación P_t^T , con el tiempo de concentración T_c en minutos.

$$P_t^{T=2 \text{ años}} = (0,21 \cdot \ln(2) + 0,52) \cdot (0,54 \cdot 1,1^{0,25} - 0,50) \cdot 9,30 = 0,134 \text{ mm}$$

$$P_t^{T=10 \text{ años}} = (0,21 \cdot \ln(10) + 0,52) \cdot (0,54 \cdot 1,1^{0,25} - 0,50) \cdot 15,00 = 0,326 \text{ mm}$$

$$P_t^{T=100 \text{ años}} = (0,21 \cdot \ln(100) + 0,52) \cdot (0,54 \cdot 1,1^{0,25} - 0,50) \cdot 22,19 = 0,715 \text{ mm}$$

3.3.9 Intensidad de la Lluvia de Diseño I

Conocidas las precipitaciones P_t^T , se obtuvo la intensidad de la lluvia de diseño con la fórmula:

$$I = \frac{P_t^T}{Tc_1}$$

Por tanto:

$$I_{2 \text{ años}} = \frac{0,326 \text{ mm}}{1,10 \text{ min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} = 9,23 \text{ mm/hr}$$

$$I_{10 \text{ años}} = \frac{0,792 \text{ mm}}{1,10 \text{ min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} = 22,45 \text{ mm/hr}$$

$$I_{100 \text{ años}} = \frac{1,737 \text{ mm}}{1,10 \text{ min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} = 49,23 \text{ mm/hr}$$

3.3.10 Caudal Aportante por Aguas Lluvias (Q)

El caudal aportante se calculó con la fórmula obtenida en 3.3.3. Para la estimación del coeficiente de escorrentía C se escogió un valor intermedio en función del tipo de superficie (0,25 para suelos arcillosos).

$$Q_{2 \text{ años}} = \frac{0,25 \cdot 17,82 \cdot 0,000167}{3,6} = 0,000107 \frac{m^3}{s} = 6,40 \text{ L/min}$$

$$Q_{10 \text{ años}} = \frac{0,25 \cdot 43,33 \cdot 0,000167}{3,6} = 0,000260 \frac{m^3}{s} = 15,57 \text{ L/min}$$

$$Q_{100 \text{ años}} = \frac{0,25 \cdot 95,02 \cdot 0,000167}{3,6} = 0,000569 \frac{m^3}{s} = 34,16 \text{ L/min}$$

3.4 Características de taludes tipo para la realización de los ensayos

Se definieron las características geométricas en base al proyecto Minimina, donde se proyectó una pendiente de 45°. Se consideró una altura 80 centímetros, por tanto, la base debe ser de 80 centímetros. Estas dimensiones, se consideraron para que los ensayos sean representativos, y a la vez la escala definida permitiera trabajar en un tiempo acotado y con volúmenes de suelo-cemento “trabajables” manualmente, ya que no se disponía de maquinaria ni equipos para excavación y compactación. En la ilustración 27 se puede apreciar un corte transversal del proyecto Minimina, donde también es posible observar la pendiente y la ubicación del suelo-cemento.

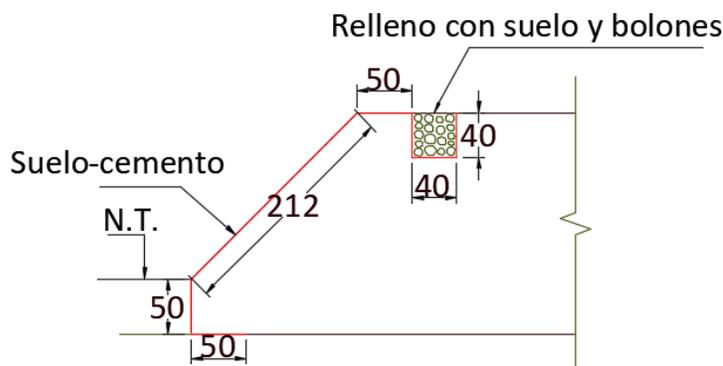


Ilustración 27: Corte transversal (cotas en centímetros).

Fuente: Planos del proyecto Minimina otorgados por el profesor Jorge Bravo González.

3.5 Dosificaciones tentativas de suelo-cemento para realizar los ensayos en base a las muestras obtenidas

En base a la investigación de dosificaciones de suelo-cemento del punto 2.7.3 (capítulo 2), se obtuvieron valores tentativos para la aplicación en taludes. Se tomaron valores similares a los recomendados por la asociación de cemento Portland (ver tabla 12), donde para el tipo de suelo correspondiente al proyecto (A-2-6) se recomienda entre un 5 % a 9 %. Se optó por probar con valores de 6 %, 9 % y una dosificación mayor a la recomendada, del 12 % con el fin de comparar con los valores anteriores. Estas dosificaciones se consideraron en volumen para simplificar los trabajos en terreno.

Grupo de suelo AASHTO	Porcentaje de cemento por peso de suelo [%]	Libras de cemento por pie cúbico de suelo-cemento compactado [lb/ft ³]	Kilogramos de cemento por metro cúbico de suelo-cemento compactado [kg/m ³]
A-1-a	3-5	5-7	80-110
A-1-b	5-8	7-8	110-130
A-2-4	5-9	7-9	110-140
A-2-5			
A-2-6			
A-2-7			
A-3	7-11	8-11	130-180
A-4	7-12	8-11	130-180
A-5	8-13	8-11	130-180
A-6	9-15	9-13	140-210
A-7	10-16	9-14	140-210

Tabla 12: Porcentaje de cemento en función del tipo de suelo.

Fuente: (Portland cement Association, 2001).

El volumen de suelo por cada probeta corresponde a 0,0541 m³ (ver anexo 1). En la tabla 13, se expresan las dosificaciones obtenidas de suelo-cemento, dando un total de 1 saco de 17,73 kg de cemento.

N ° Probeta	Volumen Suelo (m ³)	% de cemento	Litros cemento	Kilos de cemento
P-1	0,0541	0	0,0	0,00
P-2	0,0541	6	3,2	3,94
P-3	0,0541	9	4,9	5,91
P-4	0,0541	12	6,5	7,88
Total	0,2163	27	14,6	17,73

Tabla 13: Dosificaciones de suelo-cemento.

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Descripción de ensayos en terreno

Para los ensayos en terreno, primero se prepararon los taludes en función de lo especificado en los puntos 3.4 y 3.5. Una vez que estos se encontraron finalizados, se procedió a ensayar con tres caudales (determinados en el punto 3.3.10).

3.6.1 Preparación de taludes

El primer paso fue la elección de un lugar con acceso a una llave de paso y el espacio para la ejecución de los trabajos. Una vez que se eligió un sector, se retiró el material vegetal (escarpe del terreno) y se instalaron niveletas en los cuatro vértices de los taludes proyectados. Una vez dispuestas las niveletas se cortó el talud hasta llegar a las cotas establecidas.

Luego, se colocaron moldajes que permitieron confinar los taludes a ensayar. Estos moldajes fueron fabricados con tablas de 4 por 1 pulgada de sección, con las cuales se conforma el encofrado. Con la ayuda de las niveletas se dio la pendiente del talud, logrando así un ángulo de 45 °. En la ilustración 28 se aprecia la ejecución de la excavación y en la ilustración 29 se muestra la instalación del primer moldaje (este no contiene cemento).



Ilustración 28: Conformación del talud.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 29: Colocación de moldajes.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez compactada la subrasante del talud, se preparó la mezcla de suelo-cemento in situ (ver ilustración 30). Se humedeció la mezcla hasta obtener una consistencia que permitiera aplicar la mezcla como un estuco (debido a la pendiente, una mezcla con poco contenido de humedad dificulta su aplicación).



Ilustración 30: Preparación de la mezcla de suelo-cemento.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se tuvo la consistencia necesaria, se colocó la mezcla en el talud y se enrasó para dar un acabado suave (ver ilustración 31). Este proceso se realizó para todos los taludes. En la ilustración 32 se puede observar el talud con el suelo seleccionado sin adición de cemento y el talud con un 12 % de cemento.



Ilustración 31: Talud con un 12 % de cemento.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 32: Talud con suelo compactado y talud con 12 % de cemento.

Fuente: Elaboración propia.

El estado inicial de los taludes se observa en la ilustración 33, a la izquierda se encuentra el talud sin adición de cemento (T1), a continuación, el talud con 6 % de cemento, luego con un 9 % de cemento (T3), seguido del talud con 9 % de cemento y a la derecha el talud con 12 % de cemento (T4)



Ilustración 33: Taludes previo a los ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Ensayos de erosión

Estos ensayos constaron en dejar escurrir un flujo de agua por el talud en un período de una hora, esto en base a los caudales determinados en el punto 3.3.10, se comenzó por ensayar con el caudal aproximado de 6,4 L/ min. correspondiente a un período de retorno de 2 años (ver tabla 14) y luego con un caudal aproximado de 15,6 L/min. correspondiente a un período de retorno de 10 años (ver tabla 15).

Para medir este caudal, se utilizó una probeta graduada y un cronómetro (ver ilustración 34). Para cada caudal de ensayo se tomaron 3 mediciones para obtener un valor promedio del caudal.

Una vez que se logró un caudal promedio cercano al valor calculado, se colocó la manguera sobre cada talud, dejando caer el flujo de agua a unos 10 centímetros de distancia de la parte superior del talud (ver ilustración 35).



Ilustración 34: Medición de caudal para período de retorno de 10 años.

Fuente: Elaboración propia.

Medición	Tiempo (s)	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/min.)
1	9,10	0,96	0,11	6,33
2	9,32	0,97	0,10	6,24
3	9,43	0,99	0,10	6,30
Promedio	9,28	0,97	0,10	6,29

Tabla 14: Medición de caudal para un período de retorno de 2 años.

Fuente: Elaboración propia.

Medición	Tiempo (s)	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (L/min)
1	3,67	0,96	0,26	15,69
2	3,58	0,94	0,26	15,75
3	3,66	0,95	0,26	15,57
Promedio	3,64	0,95	0,26	15,67

Tabla 15: Medición de caudal para un período de retorno de 10 años.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 35: Ensayo de erosión del talud con 12 % de cemento.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Resultados de ensayos en terreno

4.1.1 Ensayo para período de retorno de 2 años

Para el primer talud (sin adición de cemento) el daño fue considerable, gran parte del material superficial fue removido en la zona de escurrimiento del caudal. Fue posible apreciar una profundidad de hasta 2 centímetros de erosión en la zona de caída del caudal (ver ilustración 36) y un ancho erosionado promedio de 25 centímetros como se aprecia en la ilustración 37. En este talud incluso se removió parte del material de mayor granulometría, en la ilustración 38 se puede apreciar una toma completa del talud ensayado.



Ilustración 36: Profundidad de erosión del talud 1 (0 % de cemento añadido).

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 37: Ancho de erosión del talud 1 (0 % de cemento añadido).

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 38: Daño observado en el talud 1.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al talud con un 6 % de adición de cemento (talud 2) el daño fue mucho menor. La profundidad máxima erosionada es apenas medible, observándose un pequeño desgaste superficial en la zona donde escurrió el caudal. En la ilustración 39, se puede apreciar que el daño provocado solo removió parte del material más fino.



Ilustración 39: Daño en el talud 2 (6 % de cemento añadido).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los taludes con un 9 % y 12 % de cemento añadido (taludes 3 y 4), no fue posible observar daño alguno. La zona donde impactó el caudal tampoco mostró desgaste observable. En las ilustraciones 40 y 41 es posible apreciar los taludes 3 y 4 luego del primer ensayo, el cual corresponde a una hora de ensayo con el caudal obtenido para un período de 2 años de retorno.



Ilustración 40: Talud con 9 % de cemento al final del primer ensayo.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 41: Talud con 12 % de cemento luego del primer ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Ensayo para período de retorno de 10 años

Debido al daño considerable en el talud 1, este se reconstituye quedando en las mismas condiciones que se encontraba en el primer ensayo.

En cuanto al ensayo con un caudal calculado en base a un período de retorno de 10 años, se repite un patrón similar a lo descrito anteriormente, diferenciando en que en el talud con un 9 % de cemento aparece un deterioro apenas visible. En la ilustración 42, se puede observar el daño luego del ensayo, donde es posible apreciar que el deterioro en los taludes de cemento disminuye a mayor adición de cemento. Respecto al talud sin cemento o talud 1 (izquierda de la ilustración 42), el daño fue muy grave; fue posible medir una profundidad de hasta 8 centímetros de erosión (ver ilustración 43) y una gran remoción de material en toda el área de escurrimiento (ver ilustración 44). En el talud con un 6 % de cemento, el daño es leve, se remueve menos de un centímetro de profundidad en los puntos críticos. El talud con 9 % de cemento resultó con un daño mínimo, presentando pequeños agujeros de menos de un centímetro de diámetro y máximo 3 milímetros de profundidad. Se sospecha que estos “agujeros” son producto de pequeños grumos de arcilla que se pueden haber producido en el proceso de mezclado del suelo-cemento). En cuanto al talud con 12 % de cemento, no se observa daño alguno.



Ilustración 42: Resultado de ensayo de erosión para un período de retorno de 10 años.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 43: Erosión en el talud 1 para 10 años de período de retorno.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 44: Desprendimiento de material del talud 1.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Resumen de resultados

En la tabla 16 se presenta un resumen de los resultados de ensayos de erosión para períodos de retorno de 2 y 10 años. En cuanto al desempeño de las mezclas de suelo-cemento y suelo sin cemento, se califican en una escala de 1 a 5, donde:

- 1 = Muy malo:
 - Daño Grave, remoción de gran parte del material del talud, socavando al menos la mitad de la profundidad del material de relleno del talud en zonas críticas.
- 2 = Malo:
 - Daño considerable, se desprende parte importante del material del talud, socavando más de un centímetro de profundidad en el talud
- 3 = Regular:
 - Daño leve, observable visualmente, socavando menos de un centímetro de profundidad en el talud.
- 4 = Bueno:
 - Daño apenas visible, observable visualmente, difícil de medir debido a que el daño es de apenas unos milímetros de profundidad.
- 5 = Muy bueno:
 - Daño no visible ni medible, el talud se comporta a la perfección.

Ensayo		Desempeño del talud			
Caudal (L/min.)	Período de retorno T (años)	T1: 0 % de cemento	T2: 6 % de cemento	T3: 9 % de cemento	T4: 12 % de cemento
6,29	2	2	4	5	5
15,67	10	1	3	4	5

Tabla 16: Resumen de resultados.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis de resultados

En base a los ensayos realizados en terreno, se puede deducir que la adición de cemento mejora considerablemente las características de los taludes.

Para los ensayos realizados con un caudal obtenido en base a un período de retorno de 2 años, los taludes con cemento demostraron un desempeño significativamente mayor. La profundidad de la erosión y el área erosionada disminuye notoriamente en los taludes mejorados con cemento. Los taludes con 9 % y 12 % de cemento no recibieron daño alguno.

En cuanto al ensayo de erosión con un caudal basado en un período de retorno de 10 años, se hace evidente la mejora del suelo a mayor cantidad de cemento. Esto se aprecia en la ilustración 45, donde se observa un gran daño en el talud sin cemento añadido, un daño leve en el talud con un 6 % de cemento y no se aprecia daño significativo en los taludes con 9 % y 12 % de cemento (en el talud con 9 % de cemento el daño es mínimo y apenas apreciable).

En la ilustración 45 se puede apreciar la zona crítica o de mayor daño de cada talud luego del ensayo con 15,67 L/ min. (promedio). En color rojo se pueden ver las zonas con mayor profundidad de erosión. Las flechas en color azul muestran aproximadamente el punto de impacto del caudal. En esta ilustración queda claro la mejora de los taludes ante la erosión, al añadir mayores concentraciones de cemento a la mezcla.

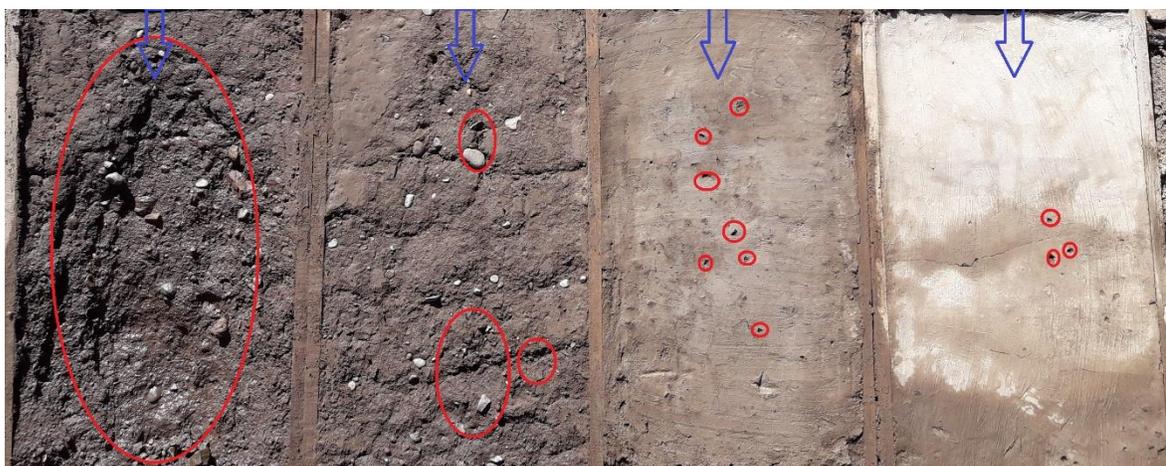


Ilustración 45: Zonas de mayor daño.

Fuente: Elaboración propia.

Al recurrir a manuales y otras fuentes bibliográficas fue posible obtener un caudal de ensaye, el cual tiene un valor cercano a los obtenidos para la zona en otros proyectos. En un principio, se pensó en utilizar el cauce de agua de una acequia para la ejecución de los ensayos, pero esto dificultaría el ajuste del caudal correcto o aproximado al que se calculó para efectos de los ensayos. Por esto la mejor alternativa fue la utilización de una manguera conectada a la sala de bombas del predio, donde medir el caudal y mantener las condiciones de ensaye resulta más sencillo.

La preparación de la mezcla se vio dificultada por el hecho de que se debieron realizar de forma manual, lo que también trae como consecuencia que no se logre una mezcla 100 % homogénea. Mientras se realiza la mezcla, se producen grumos que se componen principalmente de arcilla, los que se deben disgregar manualmente para que estos se mezclen adecuadamente con el cemento.

Otra complicación surge en el momento de colocación de la mezcla de suelo o de suelo-cemento, ya que, al trabajar con una mezcla con poca humedad, esta resulta prácticamente imposible de compactar debido a la pendiente del talud. Por el contrario, al trabajar con una mezcla muy fluida, esta no se puede compactar con pisón manual debido a que gran parte de la mezcla se adhiere a este. Producto de esto, la mejor alternativa fue trabajar con una mezcla con una consistencia similar a la de un mortero para estucos, que tenga la capacidad de adherirse al terreno inclinado y a la vez ser trabajable para dar un acabado adecuado.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones generales

Las dosificaciones utilizadas permitieron mejorar notoriamente las propiedades del suelo, aun siendo desfavorables las condiciones. La colocación del suelo y suelo-cemento en pendientes elevadas resulta compleja, por lo que es necesario añadir más agua a la mezcla para tener mayor trabajabilidad. Esto perjudica las propiedades mecánicas de la mezcla, que además se ve afectada por la compactación que se puede lograr de forma manual en este tipo de superficie.

Las condiciones del ensayo complican la medición de la erodabilidad del suelo, ya que se cuenta con un volumen relativamente grande (comparado con los volúmenes utilizados en ensayos de similar naturaleza) y que la pendiente del talud implica que el material se desprenderá y será conducido fuera de la zona de ensayo, mezclándose el material desprendido con el terreno natural.

El suelo utilizado se considera un suelo pobre como subgrado de acuerdo con el sistema de clasificación AASHTO, pero al ser mejorado con un porcentaje alto de cemento, su comportamiento mejora notablemente, pudiendo ser utilizado con otros fines.

A pesar de que los ensayos no tuvieron un nivel de precisión alto, fue posible distinguir a simple vista que la adición de cemento mejora notablemente la resistencia de los taludes a la erosión (en función del porcentaje de cemento añadido). Es por esto que el uso de mezclas de suelos cohesivos con cemento, puede ser una alternativa totalmente factible para la protección de ciertos taludes bajo algunas condiciones específicas. Una condición necesaria es la disposición de un suelo cohesivo apropiado próximo a la faena, lo que puede disminuir los costos en este tipo de proyectos.

Finalmente se puede concluir que, a pesar de algunas condiciones desfavorables, la adición de cemento mejora notablemente la capacidad de un suelo cohesivo de resistir la erosión producto del escurrimiento de agua.

5.2 Recomendaciones

- A modo de recomendación para futuros estudios, se recomienda probar distintas técnicas de aplicación de la mezcla de suelo-cemento en taludes con pendientes pronunciadas.

- Se debe tener en cuenta que los caudales obtenidos son en base a un proyecto en específico. Es por esto que se puede ensayar taludes con contenidos de cemento alto (9 a 12 %), usando distintos caudales, hasta obtener valores límites en los cuales los taludes resistan adecuadamente la erosión.
- Para aumentar la precisión del estudio, se recomienda considerar la humedad óptima de la mezcla y realizar dosificaciones con relación suelo-cemento en peso.
- En la preparación de mezclas de suelo-cemento que tengan un contenido importante de arcilla como es el caso de este estudio, se debe tener precaución de disgregar el material correctamente y disolver los grumos que se puedan formar, debido a que, si estos quedan en la cara expuesta del talud, se generará un punto débil donde se puede presentar pequeños desprendimientos ante caudales relativamente bajos.
- En caso de que se busque una mayor precisión en la medición de la erosión, se puede colocar filtros en la zona baja, para recolectar el material desprendido y así poder establecer una relación del material desprendido. Para este efecto, también se recomienda trabajar con dimensiones menores a las utilizadas en esta memoria.

BIBLIOGRAFÍA

Manuales

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (1996). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos*. Santiago de Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2005). *Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructura de aguas lluvias*. Santiago de Chile.
- MOP, DGOP, Dirección de Vialidad (2017). Instrucciones y criterios de diseño. *Manual de Carreteras*. (Vol. 3) Santiago de Chile.
- MOP, DGOP, Dirección de Vialidad (2017). Planos de obras tipo. *Manual de Carreteras*. (Vol. 4) Santiago de Chile.
- MOP, DGOP, Dirección de Vialidad (2017). Especificaciones técnicas generales de construcción. *Manual de Carreteras*. (Vol. 5) Santiago de Chile.
- MOP, DGOP, Dirección de Vialidad (2017). Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control. *Manual de Carreteras*. (Vol. 8) Santiago de Chile.
- Portland cement Association (2001). *Soil-cement Inspector Manual*. Publication PA050, Skokie, USA.

Normas

- AASHTO M-145-91 (2017). American Association of Highway and transportation Officials. USA.
- ASTM D 2487 (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA, USA.
- Instituto nacional de normalización (1968) Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales. Nch 148 Of. 68. INN, Santiago de Chile.

Publicaciones

- Aiassa, Gonzalo M, y Arrúa, Pedro A. (2007). *Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes*. *Revista EIA*, 7, 51-61.
- Barros, L.P, e Imhoff, F.A. (2010). Resistencia sísmica del suelo-cemento post tensado en construcciones de baja complejidad geométrica. *Revista de la construcción*, 9(2), 26-38.
- Centeno Pulido, Francisco (2002). *Ingeniería Biotécnica y Bioingeniería. Nuevas Tendencias de la Geotecnia para las Obras de Tierra, la Estabilización de Taludes y el Control de la Erosión*. En XVII Seminario Venezolano de Geotecnia. Caracas, Venezuela.
- Toirac, José (2008). El suelo-cemento como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, (Vol. 33) (4), 520-571. Santo Domingo, República Dominicana.

Tesis de pregrado

- John, Josept (2011). *Protección y estabilización de taludes para evitar deslizamientos* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Verdugo, Jerónimo (2007). *Desarrollo de una metodología para evaluar la susceptibilidad de los taludes de suelo al efecto de la erosión por flujo superficial* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Apuntes

- Sáez, Esteban (2010). *Fundamentos de Geotecnia*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Videos

- Camacho, L. [MrLumonca] (2011, diciembre 08). Corte de talud con excavadora [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=x9uU29MydEs>

ANEXOS

Anexo 1: Cubicaciones

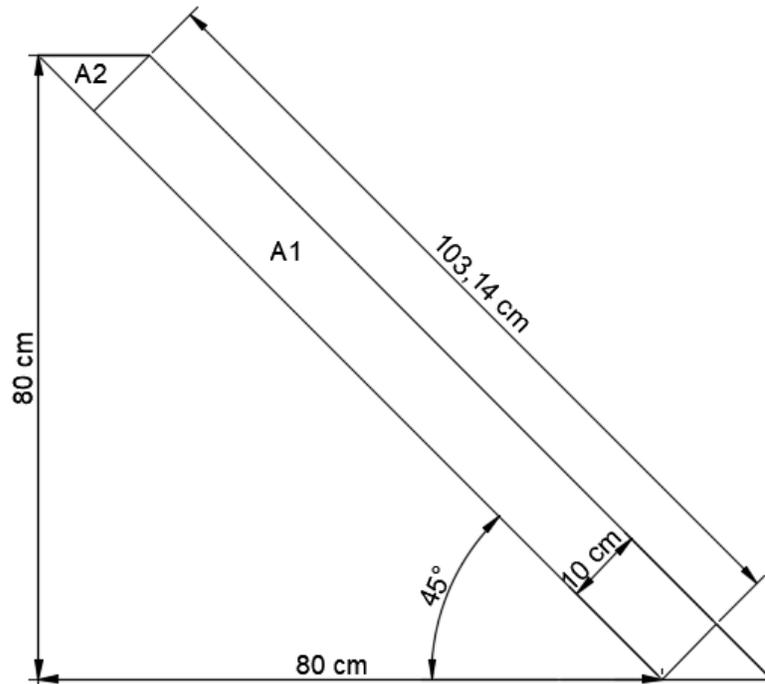


Ilustración 46: Corte transversal moldaje.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen generado por el moldaje está determinado por la suma del área 1 y el área 2 (A1 y A2 de la ilustración 46) y la profundidad que es de 50 centímetros.

$$A1 = 10 \text{ (cm)} \times 103,14 \text{ (cm)} = 1.031,40 \text{ cm}^2$$

$$A2 = \frac{10 \text{ (cm)} \times 10 \text{ (cm)}}{2} = 50,00 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área total} = 1.081,40 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, el volumen de suelo es:

$$V = 1.081,40 \text{ cm}^2 \times 50 \text{ (cm)} = 54.070 \text{ cm}^3 = 0,0541 \text{ m}^3$$

Anexo 2: Tablas

Zona Climática y región	Ciudad	Código BNA	Nombre Estación	Precipitaciones (mm)		
				24 hrs	48 hrs	72 hrs
Desierto Árido						
I. Tarapacá	Arica	1310098	Arica Chacalluta DMC	1,9	2,2	2,3
	Iquique	1820098	Iquique Cavanca	1,5	1,5	1,5
II. Antofagasta	Antofagasta	2760098	Antofagasta U. Norte	6,5	7,0	7,0
	Calama	2111098	Calama DMC	10,0	10,0	10,0
III. Copiapó	Copiapó	3450098	Copiapó DMC-DGA	25,1	25,4	25,4
	Vallenar	3823051	Vallenar DMC	32,7	39,0	40,5
Semiárida						
IV. Coquimbo	La Serena	4335050	La Serena DMC	60,3	76,7	81,9
	Ovalle	4551096	Ovalle Aeródromo	70,3	88,5	95,4
	Illapel	4726050	Illapel DOS DMC	78,2	99,9	110,9
V. Valparaíso	Valparaíso	5510097	Valparaíso Pta. Ángeles	83,3	117,3	134,4
	Los Andes San Antonio	5410051	Los Andes DMC	82,9 87,4	114,6 119,2	138,9 136,4
Mediterránea						
R. Metropolitana	Santiago	5730097	Stgo. Quinta Normal	71,0	98,4	118,6
VI. de O'Higgins	Rancagua	6010051	Rancagua DMC	68,5	99,5	131,1
VII. Maule	Talca	7378096	San Luis Talca	93,2	135,0	165,8
	Curicó	7118050	Curicó Gral. Freire	113,6	153,0	189,6
	Linares	7358051	Linares DOS	123,1	176,9	215,3
	Constitución	7384098	Constitución	119,6	166,5	204,0
VIII. Bio Bio	Concepción	8220098	Concepción	105,1	143,0	172,8
	Chillán	8117051	Chillán	107,3	149,7	185,8
IX. Araucanía	Temuco	9129098	Temuco Maquehue	82,3	105,2	118,5
Templada Húmeda						
X. de los Lagos	Pto. Montt	10425050	Pto. Montt	81,9	118,2	138,9
	Valdivia	10123052	Valdivia-Pichoy	102,9	159,3	191,1
Templada H. Oceánica	Castro	10901098	Castro	89,3	123,1	151,6
XI. Gral. Carlos Ibáñez	Coyhaique	11316050	Coyhaique Tte. Vidal	67,8	101,3	118,6
	Pto. Aysén	11342050	Pto. Aysén DGA	173,4	242,6	291,5
Fría H. Oceánica	Pta. Arenas	12586050	Pta. Arenas Naval	54,0	74,5	80,1
XII. Magallanes						

Tabla 17: Precipitaciones máximas para 10 años de período de retorno, precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días.

Fuente: (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996).

Ciudad	Duración (horas)									
	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
Arica	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Iquique	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Antofagasta	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Calama	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
San Pedro de Atacama	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Copiapó	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Vallenar	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
La Serena	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Ovalle	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Illapel	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Valparaíso	0.14	0.23	0.33	0.46	0.55	0.64	0.70	0.78	0.90	1.0
Los Andes	0.16	0.26	0.42	0.55	0.64	0.71	0.77	0.84	0.94	1.0
San Antonio	0.14	0.23	0.33	0.42	0.55	0.64	0.70	0.78	0.90	1.0
Santiago	0.16	0.26	0.42	0.55	0.64	0.71	0.77	0.84	0.94	1.0
Rancagua	0.12	0.21	0.34	0.42	0.51	0.58	0.65	0.73	0.83	1.0
Talca	0.12	0.19	0.29	0.40	0.52	0.59	0.68	0.72	0.82	1.0
Curicó	0.12	0.19	0.29	0.40	0.52	0.59	0.68	0.72	0.82	1.0
Linares	0.12	0.19	0.29	0.40	0.52	0.59	0.68	0.72	0.82	1.0
Constitución	0.19	0.30	0.38	0.47	0.56	0.64	0.70	0.77	0.89	1.0
Concepción	0.19	0.30	0.38	0.47	0.56	0.64	0.70	0.77	0.89	1.0
Chillán	0.17	0.24	0.36	0.44	0.52	0.60	0.67	0.72	0.89	1.0
Temuco	0.19	0.31	0.47	0.58	0.65	0.71	0.79	0.82	0.91	1.0
Pto. Montt	0.16	0.23	0.34	0.46	0.54	0.61	0.67	0.73	0.86	1.0
Valdivia	0.16	0.23	0.34	0.46	0.54	0.61	0.67	0.73	0.86	1.0
Ancud**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Castro**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pto. Cisnes**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Coyhaique**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pto. Aysén**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Chile Chico**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pta. Arenas**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pto. Williams**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0

Tabla 18: Coeficientes de duración de varias ciudades para lluvias de igual período de retorno.

Fuente: (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996).

Ciudad	Período de Retorno (Años)						
	2	5	10	20	50	100	200
Arica	0.55	0.82	1.00	1.17	1.14	1.56	1.81
Iquique	0.53	0.83	1.00	1.14	1.31	1.42	1.53
Antofagasta	0.53	0.83	1.00	1.18	1.42	1.60	1.78
Calama	0.58	0.85	1.00	1.12	1.22	1.36	1.50
San Pedro de Atacama	0.36	0.73	1.00	1.26	1.61	1.88	2.15
Copiapó	0.27	0.69	1.00	1.30	1.71	2.01	2.31
Vallenar	0.38	0.75	1.00	1.24	1.55	1.78	2.01
La Serena	0.49	0.80	1.00	1.19	1.44	1.62	1.80
Ovalle	0.42	0.75	1.00	1.28	1.69	2.03	2.37
Illapel	0.53	0.80	1.00	1.20	1.47	1.69	1.91
Valparaíso	0.58	0.83	1.00	1.17	1.39	1.56	1.73
Los Andes	0.56	0.82	1.00	1.18	1.43	1.61	1.79
San Antonio	0.58	0.83	1.00	1.17	1.39	1.56	1.73
Santiago	0.55	0.82	1.00	1.18	1.43	1.63	1.83
Rancagua (Rengo)	0.64	0.86	1.00	1.13	1.31	1.43	1.55
Talca (San Luis)	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Curicó	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Linares	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Constitución	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Concepción	0.63	0.85	1.00	1.14	1.32	1.46	1.60
Chillán	0.69	0.88	1.00	1.11	1.25	1.35	1.45
Temuco	0.67	0.87	1.00	1.12	1.27	1.39	1.51
Pto. Montt	0.72	0.89	1.00	1.10	1.22	1.31	1.40
Valdivia	0.70	0.89	1.00	1.11	1.24	1.34	1.44
Ancud (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Castro (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pto. Cisnes (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Coyhaique (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pto. Aysén (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Chile Chico (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pta. Arenas (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pto. Williams (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57

Tabla 19: Coeficientes de frecuencia para lluvias de igual duración.

Fuente: (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1996).