



IMPERMEABILIDAD DE LA TIERRA BAJO CONDICIONES PLUVIOMÉTRICAS EXTREMAS

Estudio de granulometría y estabilizadores

Isidora Vásquez

Profesor guía: Patricio Arias

Seminario de Licenciatura: Tecnología, Innovación y Gestión

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Universidad de Chile

INDICE

I.	Listado de Figuras.....	2
II.	Listado de tablas	3
	CAPITULO 01: Introducción.....	4
	1.1 Planteamiento del problema.....	4
	1.2 Problema de investigación.....	5
	1.3 Preguntas de investigación.....	5
	1.3.1 PREGUNTA PRINCIPAL.....	5
	1.3.2 PREGUNTAS SECUNDARIAS	5
	1.4 Objetivos	6
	1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
	1.4.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS	6
	1.4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE INVESTIGACIÓN	6
	1.5 Enfoque Metodológico.....	7
	2.1 Definición	9
	2.2 La tierra como material sostenible y sustentable	9
	2.3 Uso y propiedades de la tierra en la construcción	10
	CAPITULO 03: Técnicas de construcción con tierra frente al agua.....	13
	3.1 Respuesta del material ante climas lluviosos.....	13
	3.2 Agua líquida como principal problema.....	13
	3.3 Técnicas constructivas: Estabilización por agregado de aglomerantes	
	14	
	CAPITULO 04: Ensayos y experimentación	16
	4.1 Objetivos específicos de ensayo.....	16
	4.2 Referentes base: Investigaciones realizadas para la impermeabilización	
	de la tierra	17
	4.2.1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	17
	4.2.2 ESTABILIZADORES IMPERMEABILIZANTES NUEVOS	18
	4.3 Parámetros de estudio: aplicación de impermeabilización en tierra de	
	clima lluvioso	20

4.3.1 ZONA DE ESTUDIO	20
4.3.3 COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA TIERRA EN CHILE	21
5.4 Ensayos y experimentación.....	21
5.4.1 ETAPA CERO: Caracterización de la tierra de la zona de estudio.....	21
5.4.2 ETAPA UNO: Proporción óptima para la tierra ante la resistencia al agua.....	34
6.4.3 ETAPA DOS: Aditivos ante ensayos hídricos.....	40
6.4.4 ETAPA TRES: Búsqueda en la viabilidad de la utilización de ESP	50
CAPITULO 05: Conclusiones.....	55
CAPITULO 6: REFERENCIAS	58
CAPÍTULO 07: ANEXOS.....	60
5.1 Método para determinar el límite líquido	60
5.2 Método para determinar el límite plástico.....	65

I. Listado de Figuras

Figura 1. Prueba caída de la bola.....	11
Figura 2. Ensayo distribución granulométrica frente a la erosión hídrica.	17
Figura 3. Imagen adobe de Linares, tierra de Peñalolén, tierra de Pomaire.	22
Figura 4. Proceso de afinación de tierra mediante mortero y ensayo de tamizado.	23
Figura 5. Porción de tierra bajo tamiz N°200.....	23
Figura 6. Proceso de tamizado en malla N°40 y mezclas de tierra hidratadas para su saturación de 24 horas	24
Figura 7. Proceso manual del ensayo de Límite Plástico en instrumento Casagrande.	25
Figura 8. Cápsulas con muestras de tierra de cada ensayo luego de 24 horas en el horno a 60°C.	26
Figura 9. Proceso de ensayo para Límite Líquido.	26
Figura 10. Sistema de Clasificación de los suelos AASHTO.....	31
Figura 11. Resultado test de vidrio en tierra Peñalolén.....	33
Figura 12. Resultados de ensayo capilar en muestras de tierra de Peñalolén....	35
Figura 13. Muestras de etapa uno.	35
Figura 14. Altura de agua absorbida (cm).....	38
Figura 15. Porcentaje de agua absorbida (%).	38

Figura 16. Proceso de mezcla con ESP.....	40
Figura 17. Altura de agua absorbida (cm).....	44
Figura 18. Porcentaje de absorción de agua (%).	45
Figura 19. Montaje para ensayo de goteo. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 20. Baja de suero con regulador de goteo utilizado en ensayo.....	47
Figura 21. Proceso de elaboración de revoque.....	52
Figura 22. Muestra con 3 capas de revoque.	53
Figura 23. Muestra resultante luego de ensayo de goteo, cortado a la mitad. ..	54

II. Listado de tablas

Tabla 1. Resultados de ensayos de comportamiento frente al agua.....	18
Tabla 2. Resultados de ensayo de tamizado en tres muestras de tierra.....	23
Tabla 3. Clasificación de suelos de acuerdo a sistema AASHTO en función de IP obtenido en ensayos.....	31
Tabla 4. Resultados variación arena fina.....	36
Tabla 5. Resultados variación arena gruesa.	37
Tabla 6. Selección de muestras / proporción óptima.	39
Tabla 7. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena fina Peñalolén.....	41
Tabla 8. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena fina Linares.....	42
Tabla 9. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena fina Pomaire.	42
Tabla 10. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena gruesa Peñalolén..	43
Tabla 11. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena gruesa Linares.....	43
Tabla 12. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena gruesa Pomaire.....	44
Tabla 13. Resultados ensayo de goteo Peñalolén.....	47
Tabla 14. Resultados ensayo de goteo Linares.	48
Tabla 15. Resultados ensayo de goteo Pomaire.	48
Tabla 16. Resultados ensayos de absorción capilar en muestras con variaciones de ESP.	51
Tabla 17. Resultado ensayo de goteo en muestras con variaciones de ESP.	51

CAPITULO 01: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La tierra es un material que se ha utilizado durante miles de años. Sus técnicas constructivas han sido desarrolladas y modernizadas de tal manera que su uso está siendo cada vez más recurrente. La serie de beneficios que posee, hace de ella un material interesante para todo tipo de climas y, por lo tanto, diversos estudios han puesto su enfoque en la misma para seguir explorando su potencialidad en la arquitectura.

Es importante mencionar que la situación actual a la que nos enfrentamos contra el deterioro ambiental, genera en el área de la construcción la toma de decisiones desde una mirada hacia la sustentabilidad. La explotación de recursos para fabricar elementos como el hormigón o el acero genera una gran contaminación ambiental, y como arquitectos, debemos cambiar nuestra forma de diseñar recurriendo a los recursos naturales.

Para ello, es necesario buscar la eficacia del material aplicado para todo tipo de climas y así, masificar este tipo de arquitectura a escala mundial. Es por esto que se ahondará en el mayor inconveniente de la tierra: la vulnerabilidad al agua. Si bien se han aplicado distintas técnicas para trabajar la impermeabilidad, estos han sido escasamente probados y el tema sigue siendo un amplio campo de problemas y oportunidades que resolver.

Actualmente existen diversos estudios que buscan la forma de disminuir la permeabilidad del agua líquida en la tierra. No obstante, al ser estudios aislados y desconocidos, han tenido una baja aplicación en la práctica, por lo que, falta una mayor puesta a pruebas de los ensayos que los complementan.

Para la investigación se propone desarrollar un trabajo de documentación de distintos estudios que se han realizado para mejorar la impermeabilidad, ya sea en su distribución granulométrica o en los aditivos que se agregan al material, y ponerlo a prueba bajo una serie de ensayos. Para ello se considera tomar como referencia las condiciones climáticas de la zona más lluviosa de Chile, esta es, la de Valdivia. Así, se comprobará su efectividad ante la resistencia al agua llevando el material a una condición extrema.

1.2 Problema de investigación

Cómo mejorar la impermeabilidad de la tierra mediante aditivos y granulometría, siendo este un material heterogéneo no estandarizado, desde una perspectiva práctica en la arquitectura chilena en climas lluviosos.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 PREGUNTA PRINCIPAL

¿Cuál es el aditivo y la granulometría que mejor actúa contra la permeabilidad del agua en edificaciones de tierra ante condiciones de climas lluviosos?

1.3.2 PREGUNTAS SECUNDARIAS

¿Es posible definir la composición granulométrica de la tierra con precisión, es decir, a través de porcentajes? ¿Si es así, cuáles son los efectos de las distintas granulometrías ante la erosión hídrica?

¿Cómo se relaciona el uso de aditivos con la composición granulométrica de la tierra?

1.4 Objetivos

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir en la arquitectura sobre cómo mejorar la impermeabilización de la tierra ante condiciones de clima lluvioso partiendo de la investigación ya desarrollada hasta el momento y ponerla en práctica mediante ensayos y experimentos de laboratorio.

1.4.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS

- I. Llevar a la práctica estudios que se han realizado anteriormente sobre aditivos para comprobar su efectividad.
- II. Estudiar granulométricamente la tierra de una manera más detallada para ver su relación con la resistencia hídrica.
- III. Poner a prueba la afirmación del arquitecto G. Minke sobre la composición granulométrica de la tierra "ideal" ante condiciones hídricas.
- IV. Relacionar el uso de diferentes aditivos ya estudiados con la distribución granulométrica de la tierra.

1.4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE INVESTIGACIÓN

Para estudiar el comportamiento de la tierra frente al agua en zonas de clima lluvioso en Chile,

- I. Se toma como referente el estudio de Gernot Minke (1994) sobre la composición ideal de la tierra y se analiza la posibilidad de lograr la granulometría estipulada para mejorar la resistencia ante condiciones hídricas. Esto, con el fin de definir una composición granulométrica

estándar para todas las muestras en los ensayos posteriores y poner a prueba la teoría del arquitecto.

- II. Se consideran estudios realizados sobre estabilizantes que impermeabilizan. Para ello se toma un aditivo de origen natural y otro sintético, los cuales son cáscara de huevo pulverizada (ESP) y SIKALATEX respectivamente.
- III. Los estabilizadores / aditivos se ponen a prueba bajo ensayos hídricos. Para ello, se considera como referente la pluviometría de Valdivia, ya que es una zona de condiciones lluviosas extremas.
- IV. Se resumen los resultados en tablas y gráficos.
- V. De tener una buena respuesta con algún material, evaluar su eficiencia para introducirlo en el campo arquitectónico a escala real.

1.5 Enfoque Metodológico

Para conseguir los objetivos establecidos, en la primera parte de la investigación se realiza un trabajo de documentación y análisis de las distintas soluciones que se han utilizado a lo largo de los años para impermeabilizar la tierra. Dentro de ellas, se encuentran los estabilizadores impermeabilizantes. En una segunda parte se establecen referentes de estudios realizados para definir nuestras variables. Para ello se considera el estudio de G. Minke acerca de la distribución granulométrica con el fin de lograr la mezcla "ideal" de tierra, y de esta manera una mezcla estándar ante condiciones hídricas, la cual es nuestra variable independiente. También se considerarán los estudios de Castilla Pascual (2004) "*Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra*" y de Olaya Bulla (2018) "*Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías*" para establecer nuestras variables dependientes, estos son, los aditivos que actúan como estabilizadores.

Luego se considera oportuno establecer la investigación en una zona de clima lluvioso en Chile ya que no existe una realizada con profundidad en estas regiones. "El uso de la tierra como material de construcción se encuentra muy extendido a escala mundial. Sin embargo, algunos mapas reflejan principalmente aquella que se utiliza en climas semiáridos y áridos" (Ríos Cabrera, 2017). Para ello, se hará un levantamiento de información sobre el clima de esta zona extrema y así establecer parámetros que ayuden a realizar ensayos simulando sus condiciones pluviométricas.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de las muestras , y se buscarán alternativas más eficientes para poder aplicarlo a escala real durante la obra constructiva.

CAPITULO 02: La tierra como material de construcción

2.1 Definición

La tierra es producto de la erosión de las rocas en la corteza terrestre. Su término científico lo define como la mezcla de arcilla, arena, limos (arena muy fina) que algunas veces contiene agregados mayores como grava y piedras. "En Ingeniería, sus partículas se definen dependiendo de su diámetro: partículas con diámetros menores a 0.002 mm se denominan arcilla, entre 0.002 y 0.06 mm limo, y entre 0.06 y 2 mm arena. Partículas mayores se denominan gravas y piedras" (Minke, 1994). Según la proporción y distribución granulométrica, se obtienen cualidades físicas y mecánicas distintas en la tierra. Así, se hablará de suelos arcillosos, limosos, arenosos o gravosos.

2.2 La tierra como material sostenible y sustentable

La tierra posee una serie de propiedades que hacen de él un material beneficioso para el uso en la arquitectura. "De esta manera, la arquitectura de tierra puede proporcionar un nivel de confort idéntico o superior al habitual en la arquitectura convencional, pero sin utilizar aparatos eléctricos y valiéndose de la regulación y utilización de las propias características del material" (Gatti, 2012).

Gernot Minke define 8 puntos a favor de su uso como material sustentable para la construcción.

1. Regula la humedad ambiental. La capacidad higroscópica de la tierra se debe a que es un material poroso, lo cual permite que sus paredes puedan absorber o liberar humedad del ambiente manteniendo durante todo el año una humedad óptima de 40 - 65%.
2. Almacena calor. La inercia térmica del material permite almacenar energía dentro de su estructura para retornarla más tarde. De esta forma, su uso

en la arquitectura puede ser beneficioso para diferentes condiciones climáticas, permitiendo el equilibrio del clima interior.

3. Ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental. Gracias a su capacidad de almacenar calor, regular la humedad ambiental y aislar acústicamente, hace que sea un material eficaz para el confort habitacional sin requerir elementos y materiales adicionales.
4. Es reutilizable. La tierra es un material natural que puede volver a ser reducido a su estado original y depositado sin peligro ni molestias en cualquier lugar, sin generar problemas de degradación ambiental ni alterar las condiciones bioclimáticas.
5. Economiza materiales de construcción y costos de transporte
6. Es apropiado para la autoconstrucción
7. Preserva la madera y otros materiales orgánicos
8. Absorbe contaminantes

2.3 Uso y propiedades de la tierra en la construcción

Se tomará la definición de Patrick Bardou (1981) sobre arquitectura de tierra, como el "conjunto de edificios construidos con tierra sin cocer, excluyendo a la vez la arquitectura de ladrillo (tierra cocida) y las cavidades abiertas en los terrenos blandos".

Para poder aplicar la tierra como material de construcción, se deben considerar ciertos parámetros para lograr un correcto comportamiento mecánico y físico ante los distintos esfuerzos y factores externos a los que será sometido. Para lograr una tierra adecuada, esta debe ser limpiada de restos orgánicos (también llamado humus, que se ubica en la primera capa de tierra) y tener proporciones aproximadas de 0-15% grava, 40-65% arena, 18-35% limos y 15-20% de arcilla, el cual actúa como conglomerante y permite la fuerza de cohesión de los elementos. Existen ensayos para evaluar las condiciones granulométricas de la

tierra, tales como el "test de la pastilla" o "caída de la bola" (figura 1) y así obtener una idea aproximada de la plasticidad, cohesión o límite líquido del material.

Si bien la tierra posee una serie de beneficios para ser utilizado como material de construcción, también existen inconvenientes, los cuales deberán ser trabajados mediante estabilizadores que permitan la eficacia del material, estos son:



Figura 1. Prueba caída de la bola.

Fuente: Manual de Construcción en Tierra, Gernot Minke (1994)

1. Material de construcción no estandarizado. Se deben considerar las condiciones locales, ya que dependiendo del lugar donde se extraiga el material, obtendremos una composición y propiedad diferente. Por lo tanto, no existe una preparación universal para todo tipo de tierra.
2. Vulnerabilidad al agua. La tierra no es impermeable, por lo tanto, debe ser protegido de las lluvias y las heladas ya sea mediante elementos arquitectónicos como aleros o tratamientos impermeabilizantes, de lo contrario, se desarrollarán patologías que afectarán las propiedades mecánicas y físicas de las estructuras.
3. Contracción al secarse. Durante el proceso de secado del material, la evaporación del agua genera una retracción lineal, lo que conlleva al desarrollo de fisuras. En tierra húmeda la retracción oscila entre 3-12% y en tierra seca 0.4-

2%. Para disminuir su efecto, se puede utilizar menos agua y arcilla optimizando la composición granulométrica o mediante aditivos.

CAPITULO 03: Técnicas de construcción con tierra frente al agua

3.1 Respuesta del material ante climas lluviosos

La tierra como material de construcción, ha sido utilizada en distintas partes del mundo. Sin embargo, muchos de estos lugares coinciden en que poseen un clima semiárido o árido, encontrando todavía arquitectura de tipo patrimonial y también contemporánea. Para ampliar el conocimiento de este material y sus técnicas constructivas, es necesario ahondar un poco más en su utilización en zonas lluviosas. La gran cantidad de beneficios de este material conlleva a la necesidad de masificar su uso en todo tipo de climas, no obstante el gran inconveniente de la tierra, el agua líquida, genera patologías en los edificios que deben ser tratadas mediante el diseño de la obra y tratamientos en el material.

Así, un gran número de viviendas y edificios han sido víctimas de las lluvias, presentando fisuras y humedades debido a la filtración de agua. Esta, se puede producir en la humedad atrapada durante el proceso constructivo, humedades accidentales causadas por fugas de agua, en la humedad de condensación que ocurre en muros cuando la temperatura del exterior es menor (en países de temperatura baja), y por sobre todo, durante lluvias torrenciales.

3.2 Agua líquida como principal problema

Si bien la tierra y el agua son elementos que necesariamente se asocian a la fabricación de elementos constructivos y luego en los procesos de construcción, este último no debe volver a entrar en contacto con los productos fabricados de tierra, una vez que la obra está concluida.

Por ello, ante el conflicto de la filtración de agua en el material tierra, es necesario tomar medidas antes, durante y después de la realización de la obra. Para ello, los elementos estructurales que reciben la acción requieren protección y así evitar su destrucción.

Obviando el diseño de elementos arquitectónicos para proteger de la lluvia (como los aleros), la utilización de pinturas impermeabilizantes, teóricamente, es resistente a las inclemencias del tiempo, pero en la práctica generalmente aparecen fisuras en la superficie o se crean por una acción mecánica. Además, existe el peligro de que el agua penetre en la tierra, es por ello que la utilización de estabilizadores como tratamiento impermeabilizante de la tierra pueden ser necesarios.

Se debe tomar en cuenta que la tierra, al ser un material no estandarizado y que su composición granulométrica depende de su localidad, no todos los estabilizadores funcionan para todo tipo de tierras, por lo que el problema de la permeabilidad sigue estando en pie.

3.3 Técnicas constructivas: Estabilización por agregado de aglomerantes

Actualmente, es posible encontrar una diversidad de estabilizadores impermeabilizantes en el mercado utilizados en la práctica durante años, y algunos siguen siendo investigados. Entre ellos, podemos encontrar:

1. Cemento: Actúa como estabilizador en mezclas con bajo contenido de arcilla. El proceso de elaboración de tierra con cemento es semejante al del hormigón, con un período de 28 días para lograr la máxima resistencia y adicional 7 días como mínimo de curado. Según estudios la resistencia a la compresión descende con valores menores al 5% de este agregado (Bozzano, 2018, p.30). No es recomendable para revoques de tierra, ya que estos poseen gran cantidad de arcilla.
2. Cal: actúa como estabilizador si existe suficiente humedad y en mezclas con alto contenido de arcillas. Las mejores respuestas se obtienen agregando 4% a 8% de cal. (Hoffman, 2002, p.72)

3. Bitumen: Actúa como estabilizador en mezclas con bajo contenido de arcilla. El efecto de estabilización se optimiza si la mezcla se compacta. Por esta razón se debe disolver en agua con algún emulsionador como nafta, petróleo o parafina. Requiere una cantidad muy pequeña para obtener buenos resultados entre 3 a 6%.
4. Silicato de Sodio: Buen estabilizador para barros arenosos, pero debe ser rebajado con agua en una proporción de 1:2 a 1:8 antes de añadirlo, de lo contrario aparecen micro fisuras que provocan la absorción del agua.
5. Aceites vegetales: son muy eficaces para promover la estabilización al agua, sin embargo, disminuyen la capacidad de difusión de vapor
6. Productos de origen animal: tales como la orina, el estiércoles, la sangre y la caseína también brindan capacidad aglutinante y la estabilización contra el agua.

CAPITULO 04: Ensayos y experimentación

4.1 Objetivos específicos de ensayo

Lo que se pretende demostrar es la posibilidad de impermeabilizar la tierra con estabilizantes introducidos a la mezcla de tierra para su aplicación en arquitectura de zonas de clima lluvioso. Para ello, el programa de ensayos se dividirá en 7 partes:

1. Definición de parámetros. Se establecerá una variable independiente. Esta será la distribución granulométrica de Minke, la cual nos permitirá establecer una guía para una mezcla estándar de tierra y comprobar si es posible obtenerlo.
2. Recopilación de estudios realizados sobre estabilizantes para la tierra. Se considerará un estudio con resultados positivos en cuanto al producto SIKALATEX y un estudio donde se menciona la cáscara de huevo pulverizada (ESP) como producto potencial.
3. Levantamiento de información acerca de la pluviometría en una zona de clima lluvioso en Chile. Esta es, la de Valdivia.
4. Estudio granulométrico de la tierra en 3 zonas con buena calidad del material y accesible a su extracción. Estos son Linares, Peñalolén y Pomaire. El objetivo es llevar a cabo la distribución granulométrica aproximada de Gernot Minke (sobre el 30% de arcilla), de esta manera, se comprobará si alguna de estas muestras lo cumple.
5. Realización de ensayos con los aditivos SIKALATEX y ESP bajo una simulación en condiciones atmosféricas de clima lluvioso.
6. Analizar relación de la arena como estabilizador y los distintos aditivos en cada una de las tierras mediante gráficos de resumen.
7. Evaluar resultados y en caso de ser necesario, ver posibles alternativas para hacer más eficiente los materiales en el campo arquitectónico a escala real.

4.2 Referentes base: Investigaciones realizadas para la impermeabilización de la tierra

4.2.1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Se considera importante trabajar la distribución granulométrica para efectos de impermeabilización de la tierra y así potenciar el material para su funcionalidad. Para ello, se tomará como referencia el ensayo de erosión en bloques de barro realizado por Gernot Minke, y así establecer una idea estándar aproximada de la mezcla de tierra óptima.

En este ensayo, se vertieron 10 litros de agua por un lapso de 2 minutos en 3 bloques de barro distintos. El adobe del centro con alto contenido de limo presentó una erosión extrema de 5 mm de profundidad. El adobe de la derecha con mayor contenido de arcilla (30% aproximadamente) presentó una erosión de 3 mm y el adobe de la izquierda con el mismo contenido de arcilla pero con menos arena fina y más arena gruesa, mostró una ínfima erosión. Como aproximación general, se obtiene que en mezclas con 30% de arcilla y gran cantidad de arena gruesa optimiza la funcionalidad para efectos de impermeabilización.

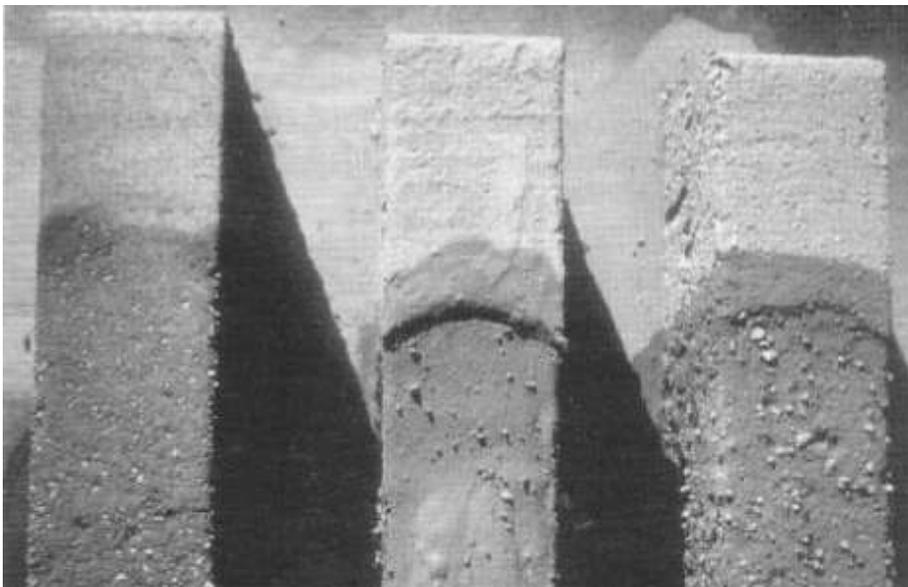


Figura 2. Ensayo distribución granulométrica frente a la erosión hídrica.
Fuente: Manual de Construcción en Tierra, Gernot Minke (1994)

4.2.2 ESTABILIZADORES IMPERMEABILIZANTES NUEVOS

Se considera como referencia la investigación realizada por Castilla Pascual (2004) en la ciudad de Madrid "Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra". En este se toma como punto de partida el trabajo sobre "consolidación de muros de tapial" en el cual se hizo un amplio estudio sobre el comportamiento de distintos productos mezclados con tierra cuyos resultados se resumen en la siguiente tabla:

(NUM. DE LA MEZCLA)	HUMEDAD - SEQUEDAD (1)						GOTEO (2)			LLUVI ARTIFI (3)
	PERDIDA PESO			ABSORCION			1	2	3	
	1	2	3	1	2	3				
0. TIERRA	-	-	-	-	-	-	M	B	-	4,7
1. SIKACEM	-	-	-	-	-	-	M	B	B	13,0
2. SIKALATEX	2,4	4	-	7,2	9,1	14,0	A	A	A	4,0
3. LINAZA	9,3	5,3	-	10,7	12,0	10,4	M	M	M	6,8
4. SIKAL 1	7,5	-	-	11,5	-	-	B	M	M	6,7
5. SIKALITE	6,7	5,5	4,6	14,9	12,6	11,9	M	B	B	20,1
6. AZUFRE / CAL	-	-	-	-	-	-	A	A	A	0,0(*)
7. CAL / CENIZA	5,8	-	-	14,7	-	-	M	M	A	-
8. YESO	-	-	-	-	-	-	M	B	B	11,0
9. ESTABIRAM	7,2	8,0	5,6	7,3	12,3	14,4	M	M	M	8,9
10. DODIGEN	6,4	-	7,8	10,8	17,8	13,5	M	M	M	7,8
11. CERA DETERGEN.	8,4	-	-	16,7	-	-	M	M	M	6,5
12. ACEITE DE OLIVA	-	5,8	5,5	14,4	6,5	7,2	M	M	M	12,8
13. CAL / CEMENTO	-	-	-	-	-	-	A	A	A	0,0
14. CEMENTO	-	4,5	1,1	-	11,9	13,7	A	A	A	0,0
15. CAL	-	5,0	3,0	-	8,0	19,7	A	M	A	0,0
16. AGUA DE CAL	7,6	57,3	5,9	14,4	16,0	14,9	M	M	M	3,7

(1) . Valores en % de peso inicial
(-) No han superado los 12 ciclos del ensayo

(2) Comportamiento del material:
A. (Alto): No hay perforaciones. Ligero escurrimiento
M. (Medio): Perforación hasta 1cm. Reblandecimiento
B. (Bajo): Perforación de más de 1cm. Desprendimientos

(3) Profundidad de la erosión en cm
(*) Mínima erosión superficial

(En negrita los valores más favorables en cada ensayo. Los ensayos se describen con detalle en el siguiente capítulo)

Tabla 1. Resultados de ensayos de comportamiento frente al agua.

Fuente: Castilla Pascual, 2004. Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra.

De la tabla 1 se concluye que el producto que mejores resultados tiene es el SIKALATEX, el cual disminuye la absorción de agua y erosión hídrica, que a la vez,

aumenta la resistencia a la compresión y la dureza superficial. Esta se añade a la cantidad de agua a utilizar para la mezcla en proporción 1 a 15 partes de agua. Luego, a través de la realización de diversos ensayos para su aplicación en morteros, se concluye que las emulsiones acuosas de estireno-butadieno (SIKALATEX) pueden mejorar durabilidad en muros de tierra sin afectar estéticamente o perjudicarlos mecánicamente.

1. Pueden mejorar hasta en un 50% la capacidad de adherencia sobre los muros de tierra, así como su cohesión interna.
2. No solo funciona para morteros, sino que para cualquier otra técnica constructiva (adobe, tapial, quincha, etc).
3. Disminuye capacidad de absorción de agua y por lo tanto, durabilidad frente a la erosión.
4. La capacidad de difusión de vapor se ve afectada con una disminución ínfima, inapreciable en resultados.
5. Asequible y accesible en el mercado.

También se considerará la investigación realizada por Olaya Bulla (2018) "Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías" en el que reúne ensayos realizados con cáscara de huevo pulverizada (ESP, por sus siglas en inglés Eggshell Powder). Aquí se menciona el estudio de Amu (2005) en el cual sustituye la cal viva como estabilización por ESP, en una proporción del 15% del total de la mezcla de tierra aproximadamente (1 parte de ESP por 7 partes de tierra). Se concluye que los resultados son igual de óptimos, mejorando las propiedades de la tierra sin perder la resistencia a la compresión. Sin embargo, no se han investigado con profundidad parámetros como absorción de agua y erosión hídrica, por lo que es un factor que se evaluará más adelante.

4.3 Parámetros de estudio: aplicación de impermeabilización en tierra de clima lluvioso

4.3.1 ZONA DE ESTUDIO

El objetivo de la investigación es poner a prueba el material tierra frente a las condiciones climáticas lluviosas para ver cómo responde a la absorción y erosión hídrica. Para ello, el estudio tomará como referencia el clima de una de las regiones más lluviosas de Chile y así observar hasta qué punto la tierra puede resistir a este clima extremo de grandes precipitaciones. Para ello, se escogerá la ciudad de Valdivia, "siendo Valdivia un lugar especialmente lluvioso, la ciudad como tal es la más lluviosa de Chile, eso no es un mito es una realidad, más que Puerto Montt según los datos duros de estadísticas de 50 años" (Brümmer, 2021).

4.3.2 CLIMA: PRECIPITACIONES Y HUMEDAD RELATIVA

Valdivia es una de las ciudades más lluviosas de Chile, con un promedio de 191 milímetros en época de invierno (junio-julio) y 33 milímetros en enero¹. Así, se ha podido reportar un total aproximado de 22 días de lluvia en el mes de mayo, junio y julio, y un total aproximado de 7 días en el mes de febrero.

Para la investigación es necesario definir qué es un milímetro en el contexto meteorológico para luego abordarlo desde un análisis experimental y así aplicarlo en los ensayos. Un milímetro de agua equivale a vaciar un litro de líquido en un espacio de un metro cuadrado. Es decir, si vertiéramos un litro de agua en un recinto cerrado de un metro cuadrado de superficie (de cualquier forma) el volumen de agua mediría exactamente un milímetro de espesor. De esta forma la conversión quedaría así: $1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2 = 1000 \text{ mL/10000 cm}^2$.

¹ Weather Spark. El clima y el tiempo promedio en todo el año en Valdivia. Obtenido de: <https://es.weatherspark.com/y/24136/Clima-promedio-en-Valdivia-Chile-durante-todo-el-año>

4.3.3 COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA TIERRA EN CHILE

Según Ibañez (2008) las condiciones montañosas de Chile, con fuertes pendientes entre los relieves de la cordillera de Los Andes y el nivel del océano Pacífico, generan en los suelos poco desarrollo en sus perfiles, y por lo tanto, son suelos jóvenes en su evolución y de poco desarrollo (bajo contenido de arcilla, alta en limo y gran contenido de gravas y arenas gruesas). De esta manera, los suelos son formados a partir de la meteorización de rocas antiguas, encontrando una variedad de suelos in situ; depósitos de cenizas volcánicas, depósitos glaciales, fluvioglaciales y aluviales.

Los suelos residuales provenientes de la meteorización de las rocas ígneas y metamórficas se localizan en la cordillera de la Costa, coexistiendo con suelos de origen de cenizas volcánicas. Los suelos de origen de depósitos glaciares, fluvioglaciales y aluviales se localizan fundamentalmente en la depresión intermedia de Chile central y sur, y planicies patagónicas de Chile austral.

En base a ello, se deberá realizar un criterio de selección de la muestra de tierra para encontrar la más arcillosa o menos limosa dentro de lo posible, ya que según el estudio de Minke, una gran cantidad de limos puede empeorar las condiciones frente al agua generando más erosión.

5.4 Ensayos y experimentación

5.4.1 ETAPA CERO: Caracterización de la tierra de la zona de estudio.

Como se mencionó anteriormente, se tomará como referente la distribución granulométrica estudiada por Gernot Minke para mejorar la eficiencia de la tierra en torno a la absorción de agua líquida. Para ello, es necesario considerar las condiciones y características del material en las tres zonas de estudio para efectos de impermeabilización contra el agua y ver si es posible lograr el objetivo de Minke.

Proceso:

1. Se recogen 3 muestras de tierra: Pomaire, Linares (a partir de adobes utilizados en la obra Iglesia de Nuestra Señora de la Merced de Codegua) y Peñalolén. Estas muestras son elegidas debido a que se reconocen como tierras de buena calidad y accesible a su extracción (en el caso de Peñalolén), siendo utilizados para elaboración de artesanía de greda y fabricación de ladrillos de arcilla.



Figura 3. Imagen de izquierda a derecha: adobe de Linares, tierra de Peñalolén, tierra de Pomaire.

Fuente: Elaboración propia

2. Se busca obtener la caracterización de cada una de las muestras de tierra. Para ello, es necesario separar sus partes (arcilla, limo, arena fina y arena gruesa) y así analizar cuál es su composición granulométrica. De esta manera lo que se pretende lograr es saber qué porcentaje hay de arcilla en la tierra, para saber si es posible cumplir lo estipulado por Gernot Minke sobre la utilización de una tierra con 30% de arcilla para una mejor resistencia a la erosión del agua.
3. Para la separación de las partes de la tierra se recurre al **laboratorio de Geología de la Universidad de Chile**, donde es posible encontrar mallas de filtración muy finas y rigurosas en cuanto a medida del tamiz. Sin embargo, para obtener buenos resultados, es necesario moler la tierra ya que en su estado natural posee muchos grumos (algunos del tamaño de piedras) que a veces solo es tierra "apretada", y en el caso de Linares, la tierra se extrae a partir de un adobe. Para ello, se utilizó la

ayuda de un mortero de piedra y así afinar el material para posteriormente llevarlo a tamices de granulometría fina.



Figura 4. Proceso de afinación de tierra mediante mortero y ensayo de tamizado.

Fuente: Elaboración propia

De este proceso se obtuvieron los siguientes resultados:

Malla	Granulometría	Tierra Peñalolén (g)	% del total	Tierra Linares (g)	% del total	Tierra Pomaire (g)	% del total
60	Arena gruesa	735	51,4	325	53,7	715	77,3
200	Arena fina	385	26,9	145	24	145	15,7
Bajo 200	Arcilla / Limo	310	21,7	135	22,3	65	7
	Total =	1.430	100	605	100	925	100

Tabla 2. Resultados de ensayo de tamizado en tres muestras de tierra.

Fuente: Elaboración propia

A pesar de haber podido filtrar en su mayoría las partes de la tierra, el último tamizado para distinguir la arcilla del limo no se pudo concretar, ya que la malla tiene un máximo de 0.075 mm a filtrar (considerando el grano de limo y arcilla de 0.02-0.002 mm y menor a 0.002 mm



Figura 5. Porción de tierra bajo tamiz N°200.

Fuente: Elaboración propia

respectivamente, los cuales son de un tamaño ínfimo), por lo que ambas composiciones quedaron bajo una misma categoría sin poder distinguir sus porcentajes. Sumado a ello, los resultados en la tierra de Pomaire

fueron drásticamente diferentes en comparación a Peñalolén y Linares, teniendo un 7% de arcilla/limo versus 21-22%. Como teoría se tiene que la tierra de Pomaire, al tener una textura muy arcillosa, sus partes son más difíciles de moler con mortero de piedra debido a su capacidad de aglomeración, lo cual significa también que el proceso manual de moler la tierra no tiene resultados muy reales.

4. Para obtener una caracterización más detallada en cuanto a la posesión de arcilla, se debe recurrir a ensayos que se elaboran a nivel profesional. Para ello se visita a una empresa dedicada a obras de pavimentación y fabricación de mezcla asfáltica llamado **"Petroos Quilin"**, ya que en su laboratorio son recurrentes los ensayos para determinar el **Índice de Plasticidad** de una muestra de suelo (Anexo 7.1 y 7.2).

En un primer paso fue necesario tamizar la tierra por una malla N°40 (0,5 mm) para posteriormente hidratarla hasta llegar a su estado plástico (agua y tierra mezclada homogéneamente) y se deja saturar por 24 horas. Una vez curado el material, se reduce la humedad mediante la revoltura de la mezcla con la espátula.



Figura 6. Proceso de tamizado en malla N°40 (izquierda) y mezclas de tierra hidratadas para su saturación de 24 horas (derecha).

Fuente: Elaboración propia

El segundo paso fue determinar el Límite Plástico de las muestras de tierra, que se define como *humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina*

Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluyan y entren en contacto en una longitud de 10 mm aplicando 25 golpes.²

Para ello se utilizó instrumento llamado Casagrande. En este ensayo se dispone una porción de tierra sobre la taza de bronce y se divide en 2 porciones simétricas entre sí con una separación de 2 mm mediante un acanalador. La manivela se gira de manera que se deje caer la taza con una frecuencia de 2 golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura entren en contacto. Luego, se extrae la porción del centro que entró en contacto, se guarda en una cápsula y se pesa.



*Figura 7. Proceso manual del ensayo de Límite Plástico en instrumento Casagrande.
Fuente: Elaboración propia*

Se repite el procedimiento 5 veces, pero estos deben estar comprendidos entre un rango de golpes: 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, de manera que el ensayo se realiza desde la condición más húmeda a la más seca, en ningún caso de debe rehumedecer la pasta de tierra. Finalmente las 5 cápsulas se pesan antes y después del secado en un horno a 60°C durante 24 horas con el fin de construir un gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica.

² Límite Líquido definido por Manual de Carreteras, Volumen N° 8. Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensayo y Control



Figura 8. Cápsulas con muestras de tierra de cada ensayo luego de 24 horas en el horno a 60°C.
Fuente: Elaboración propia

En un tercer paso, se determinó el Límite Plástico de las muestras de tierra, que se define como *humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.*³

Como bien se define el término Límite Plástico, este ensayo consiste en tomar una porción de muestra de ensayo acondicionada y amasarla entre las manos. Luego, se hace rodar sobre una superficie de amasado, en este caso, una placa de vidrio esmerilado de 20x20 cm, y se forman cilindros con los dedos. Se repite esta operación hasta que el cilindro de 3 mm se disgregue sin poder ser reamasado y reconstituido. Las fracciones de cilindro disgregado se guardan en cápsulas de secado y se pesan. Se repite procedimiento tres veces de manera que

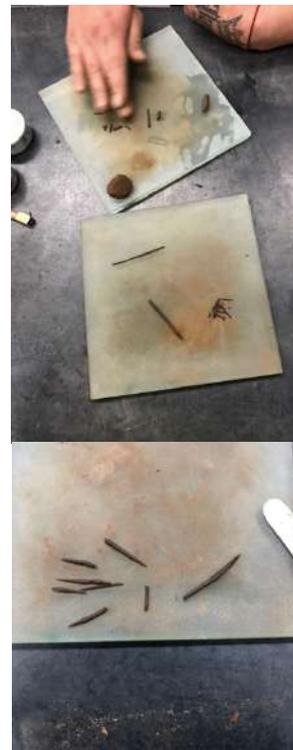


Figura 9. Proceso de ensayo para Límite Líquido.
Fuente: Elaboración propia

³ Límite Plástico definido por Manual de Carreteras, Volumen N° 8. Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensayo y Control

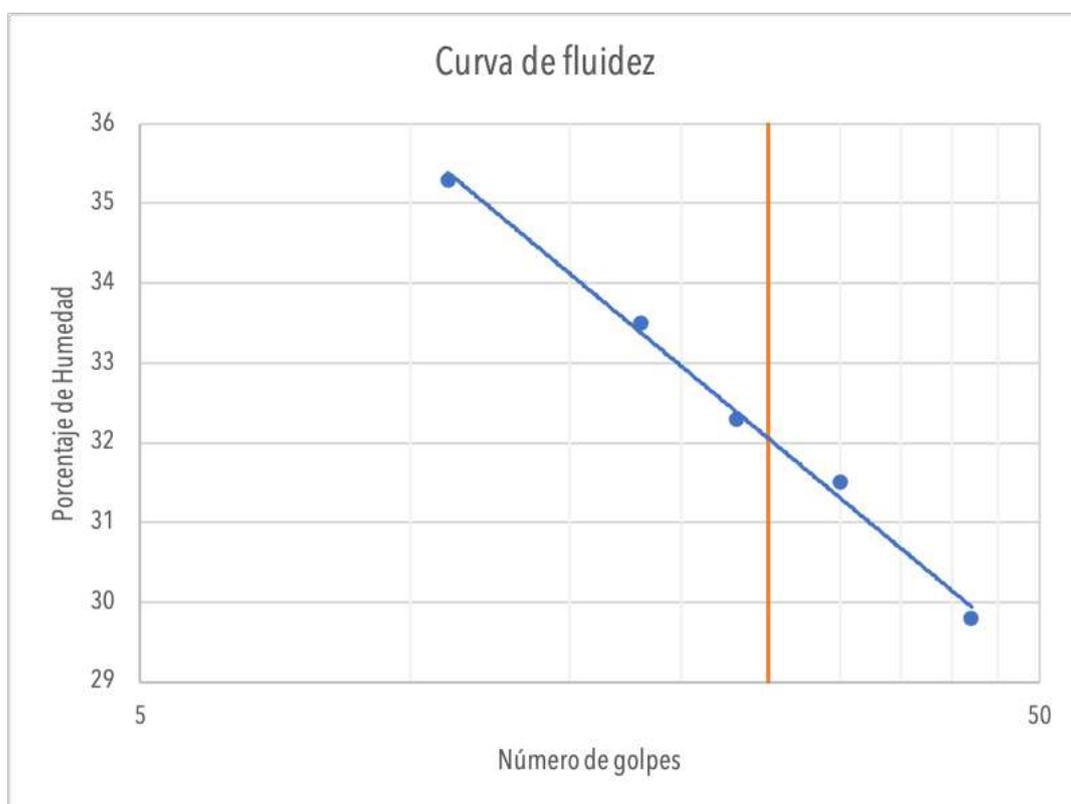
hayán tres cápsulas. Finalmente se dejan en un horno de secado a 60° C durante 24 horas y se pesan nuevamente.

Teniendo estos 3 pasos realizados, con el ensayo de Límite Líquido y Límite Plástico finalizados, se pesan todas las cápsulas (de ambos ensayos) luego de 24 horas de secado en un horno a 60°C. Con estos pesos, fue posible anotar los datos en la ficha de ensaye elaborado por el Manual de Carreteras.

De esta manera se obtuvieron los siguientes gráficos:

MUESTRA DE TIERRA: LINARES

Sección 8.102.4 Determinación de Límite Plástico				Sección 8.102.3 Determinación de Límite Líquido				
Índice de Plasticidad	Límite Plástico			Límite Líquido				
Ensayo N°	1	2	3	1	2	3	4	5
Cápsula N°	15	4	4	14	1	7	8	10
Número de golpes	-	-	-	11	18	23	30	42
1. Peso cápsula + Suelo Húmedo (gr)	20,2	18,8	16,6	21,3	24,1	23,28	20,2	25,15
2. Peso Cápsula + Suelo Seco (gr)	19,3	17,7	15,6	18,83	20,92	20,44	18,07	22,09
3. Peso Cápsula (gr)	13,7	11,3	9,84	11,83	11,44	11,65	11,31	11,82
4. Peso Agua (1-2) (gr)	0,96	1,06	0,97	2,47	3,18	2,84	2,13	3,06
5. Peso Suelo Seco (2-3) (gr)	5,59	6,44	5,79	7	9,48	8,79	6,76	10,27
6. Humedad (4/5) x 100 (%)	17,2	16,5	16,8	35,3	33,5	32,3	31,5	29,8
7. Promedio Límite Plástico (%)	16,8							

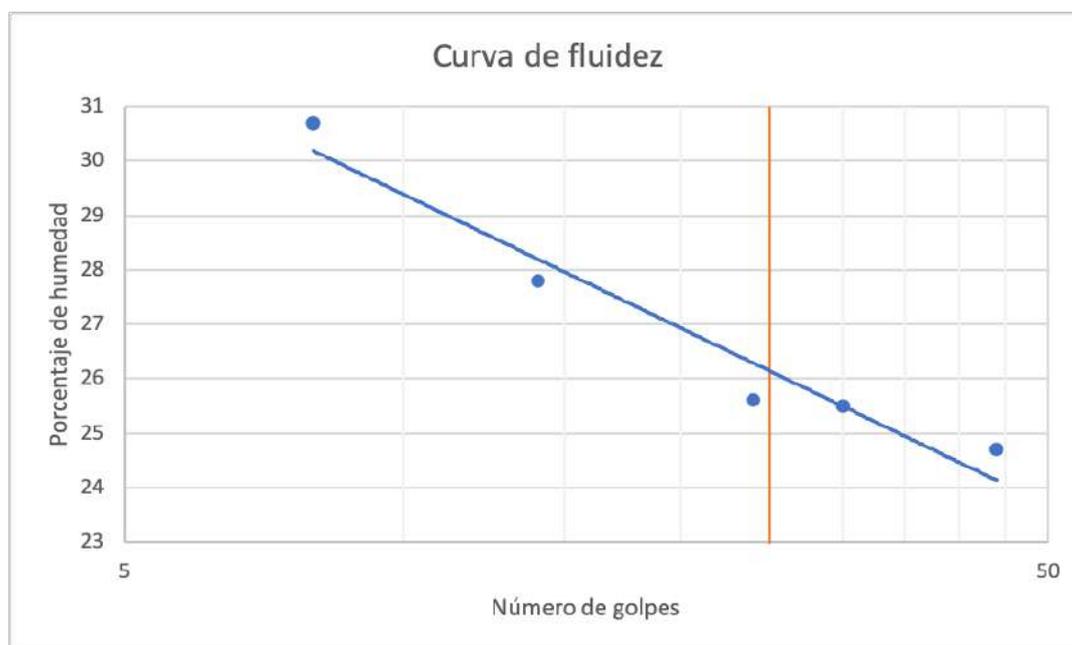


Límite Líquido (LL) (%)	32	Límite Plástico (LP) (%)	16,8	Índice de Plasticidad (IP = LL - LP) (%)	15,2
-------------------------	----	--------------------------	------	--	-------------

*LL en el gráfico es el valor de intersección de ambas líneas relacionado al porcentaje de humedad

MUESTRA DE TIERRA: PEÑALOLÉN

Sección 8.102.4 Determinación de Límite Plástico				Sección 8.102.3 Determinación de Límite Líquido				
Índice de Plasticidad	Límite Plástico			Límite Líquido				
Ensaye N°	1	2	3	1	2	3	4	5
Cápsula N°	A	B	C	D	E	F	G	H
Número de golpes	-	-	-	8	14	24	30	44
1. Peso cápsula + Suelo Húmedo (gr)	20,2	21,2	23,3	29,21	31,36	31,81	25,79	31,09
2. Peso Cápsula + Suelo Seco (gr)	20	20,1	22,3	25,69	27,85	28,29	23	28
3. Peso Cápsula (gr)	14,3	14,1	16,7	14,23	15,21	14,53	12,07	15,47
4. Peso Agua (1-2) (gr)	1,08	1,1	1,02	3,52	3,51	3,52	2,79	3,09
5. Peso Suelo Seco (2-3) (gr)	5,7	5,95	5,62	11,46	12,64	13,76	10,93	12,53
6. Humedad (4/5) x 100 (%)	18,9	18,5	18,1	30,7	27,8	25,6	25,5	24,7
7. Promedio Límite Plástico (%)	18,5							

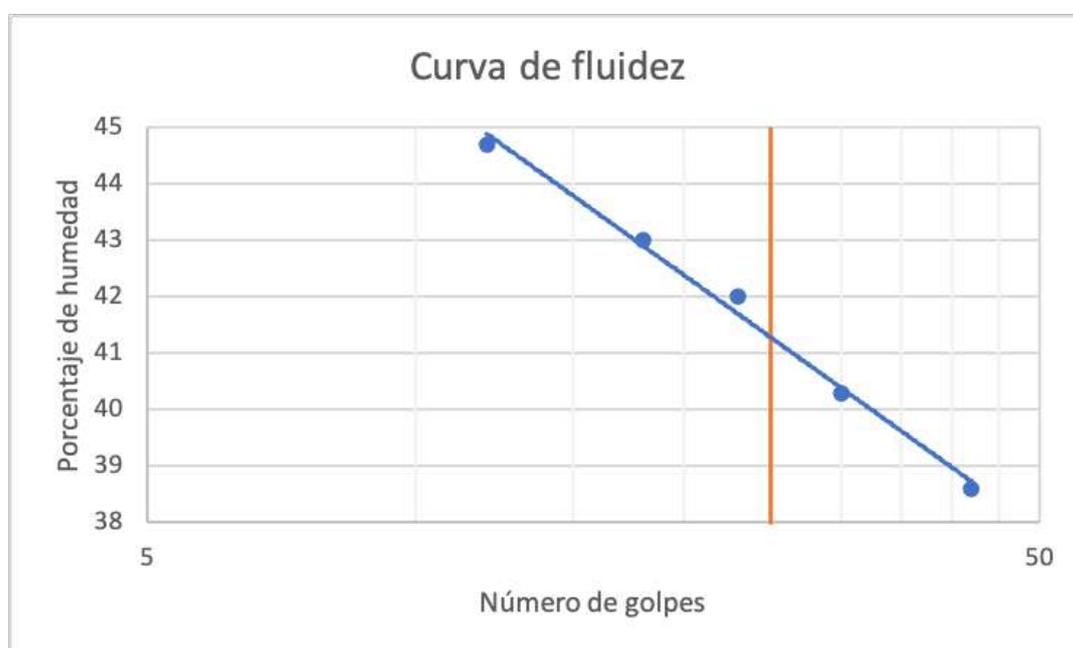


Límite Líquido (LL) (%)	26,3	Límite Plástico (LP) (%)	18,5	Índice de Plasticidad (IP = LL - LP) (%)	7,8
-------------------------	------	--------------------------	------	--	------------

*LL en el gráfico es el valor de intersección de ambas líneas relacionado al porcentaje de humedad

MUESTRA DE TIERRA: POMAIRÉ

Sección 8.102.4 Determinación de Límite Plástico				Sección 8.102.3 Determinación de Límite Líquido				
Índice de Plasticidad	Límite Plástico			Límite Líquido				
Ensayo N°	1	2	3	1	2	3	4	5
Cápsula N°	3	6	D3	9	2	12	13	5
Número de golpes	-	-	-	12	18	23	30	42
1. Peso cápsula + Suelo Húmedo (gr)	17,96	18,13	19,85	22,27	21,25	23,8	25,09	22,36
2. Peso Cápsula + Suelo Seco (gr)	17,13	17,23	18,87	19,29	18,32	20,2	21,33	19,31
3. Peso Cápsula (gr)	12,25	12,12	13,44	12,62	11,51	11,63	12,07	11,41
4. Peso Agua (1-2) (gr)	0,83	0,9	0,98	2,98	2,93	3,6	3,74	3,05
5. Peso Suelo Seco (2-3) (gr)	4,88	5,11	5,43	6,67	6,81	8,57	9,28	7,9
6. Humedad (4/5) x 100 (%)	17	17,6	18	44,7	43	42	40,3	38,6
7. Promedio Límite Plástico (%)	17,5							



Límite Líquido (LL) (%)	41,3	Límite Plástico (LP) (%)	17,5	Índice de Plasticidad (IP = LL - LP) (%)	23,9
-------------------------	------	--------------------------	------	--	-------------

*LL en el gráfico es el valor de intersección de ambas líneas relacionado al porcentaje de humedad

5. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS. Con los valores de IP de cada muestra de tierra calculados, se procede a clasificar los suelos de acuerdo al Sistema de Clasificación AASHTO. Este sistema describe un procedimiento para clasificar los suelos en siete grupos, basado en las determinaciones de laboratorio de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad.⁴

SISTEMA DE CLASIFICACION AASHTO											
Clasificación General	Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa 0,08 mm)							Suelos Finos ($> 35\%$ Bajo 0,08 mm)			
Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*				A-7-5** A-7-6**
2 mm.	≤ 50										
0,05 mm.	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0,08 mm.	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35				≥ 36			
W_L				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena Fina	Gravas y Arenas Limosas o Arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
** A-7-5: $IP \leq (W_L - 30)$						A-7-6: $IP \geq (W_L - 30)$					
$IG = (B/0,08-35)(0,2 + 0,005(W_L - 40)) + (B/0,08 - 15)(IP-10) \times 0,01$											
* Para A-2-6 y A-2-7:						$IG = (B/0,08 - 15)(IP-10) \times 0,01$					
Si el suelo es NP \rightarrow						IG = 0; Si $IG < 0 \rightarrow IG = 0$					

Figura N°9 Sistema de Clasificación AASHTO

Figura 10. Sistema de Clasificación de los suelos AASHTO.
Fuente: Curso Laboratorista Vial. Volumen III. Geotecnia

Muestra de tierra	IP (número entero)	Descripción
Linares	15	Suelo arcilloso
Peñalolén	8	Suelo limoso
Pomaire	24	Suelo arcilloso

Tabla 3. Clasificación de suelos de acuerdo a sistema AASHTO en función de IP obtenido en ensayos. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Sistema de Clasificación AASHTO, se obtuvo como resultado que la muestra de Linares y Pomaire corresponde a un suelo de tipo arcilloso, teniendo este último un 9% más de plasticidad, lo que significa que tiene mayor porcentaje de arcilla, mientras que la muestra de Peñalolén corresponde a un suelo de tipo limoso con un IP menor a 10.

⁴ Sistema AASHTO. Laboratorio Nacional de Vialidad. Curso Laboratorista Vial Volumen III, 2021, p. 40.

A pesar de haber obtenido resultados detallados sobre qué tan arcillosa es la muestra de tierra de acuerdo al índice de plasticidad, es importante mencionar que este tipo de ensayo no entrega resultados de acuerdo al porcentaje granulométrico específico de la tierra, vale decir, cantidad de arcilla, limo y arenas que posee.

6. Para continuar con la búsqueda del porcentaje granulométrica de la tierra se recurre a ensayo de Red Proterra (2009) llamado TEST DEL VIDRIO. Este test es fundamentado en la sedimentación diferenciada de los constituyentes de la tierra ⁵ y consiste en :

- i. Colocar una porción de tierra, seca y desmenuzada, en un vidrio cilíndrico, liso y transparente, hasta cerca de 1/3 de su altura;
- ii. Adicionar agua hasta 2/3 de la altura del vidrio, acrecentando una poca de sal (la sal ayuda a desunir - o separar - las partículas de arcilla, pero, si es utilizada en demasía puede actuar de forma contraria);
- iii. Tapar el vidrio y agitar vigorosamente la mezcla para que haga la dispersión del suelo en el agua;
- iv. Dejar en reposo por 1 h y, en seguida, promover nueva agitación;
- v. Colocar el vidrio en reposo, sobre una superficie horizontal. Cada uno de los componentes de la tierra decanta en tiempos diferentes, formando distintas capas que se puede visualizar. La grava y la arena decantan primero, por ser las partículas más pesadas, seguido del limo y por último la arcilla. Si el suelo contiene materia orgánica, ésta flota en la superficie del agua.
- vi. Cuando el agua esté limpia, medir la altura de las distintas capas.

Para la realización del test de vidrio se utilizó solo la porción de arcilla y limo previamente tamizada en el Laboratorio de Beauchef y dispone dentro de una botella de vidrio delgada. Se selecciona primero la tierra de Peñalolén, ya que según el método del índice de plasticidad, esta

⁵ Método del test del vidrio para caracterización de suelos. Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra. Red Iberoamericana PROTERRA, 2009.

posee una caracterización de tipo limosa, por lo que se podría decir que habrá una mayor visualización en la presencia de limo.

A pesar de haber seguido el proceso descrito por Red Proterra, no se obtuvieron resultados notorios en la separación de arcilla y limo. Se prueba con un reposo de 24 horas, logrando ver una fina capa en la zona superior correspondiente a materia orgánica, pero respecto a la zona de arcilla y limo, el resultado permanece invariante.



*Figura 11. Resultado test de vidrio en tierra Peñalolén
Fuente: Elaboración propia*

OBSERVACIONES DE ETAPA CERO

Luego de haber realizado tres ensayos enfocados a la caracterización de suelos, en los que es posible definir una aproximación de la tierra en cuanto a posesión de arcilla, limos y arenas, no es factible reconocer el porcentaje granulométrico detallado y real de la tierra para efectos de la investigación.

Se considera que este es una problemática necesaria a resolver para comprobar si lo que menciona Gernot Minke sobre la posesión de la tierra con 30% de arcilla es posible calcularlo o definirlo.

Como consecuencia, durante la investigación se trabajará con las mismas tres muestras (Peñalolén, Linares y Pomaire) y así ver cómo responden las diferentes caracterizaciones del suelo con la variación de arena fina y gruesa, y así, con los distintos aditivos impermeabilizantes.

5.4.2 ETAPA UNO: Proporción óptima para la tierra ante la resistencia al agua

Esta etapa consiste en obtener una estabilización óptima para cada tipo de tierra ante condiciones hídricas a través de la estabilización con arena.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo es llegar a las aproximaciones de G. Minke, esto es 30% de arcilla y gran cantidad de arena gruesa en la mezcla. Al ser esta última una definición muy general, se pretende analizar cómo puede variar sobre la mezcla la utilización de arena fina versus la de arena gruesa en morteros.

Para ello, el muestreo se ordenará en 2 tandas: en la primera se utilizará solo la variación de tierra-arena fina y en la segunda la variación de tierra-arena gruesa.

Se recurre a **ensayo de ascensión capilar** para obtener la mejor mezcla en cada tanda de muestras.

Objetivo: Comprobar cuál es la proporción más óptima para cada tipo de tierra para resistir la permeabilidad al agua mediante la variación tierra-arena. Se dispondrán las muestras sobre un paño húmedo durante 40 minutos.

Muestras:

Primera tanda

1 de tierra : 1 de arena fina (3 muestras, 1 por cada tierra).

1 de tierra : 2 de arena fina (3 muestras, 1 por cada tierra)

Número total: 6

Segunda tanda:

1 de tierra : 1 de arena gruesa (3 muestras, 1 por cada tierra).

1 de tierra : 2 de arena gruesa (3 muestras, 1 por cada tierra)

Número total: 6

Mediciones del ensayo: Altura (cm) y porcentaje de aumento de peso (%) de agua absorbida en los discos.

Se tomará la muestra con menor altura y porcentaje de agua absorbida como la proporción ideal ante la resistencia al agua para cada tipo de tierra.



Figura 12. Resultados de ensayo capilar en muestras de tierra de Peñalolén.
Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Muestras de etapa uno. Fila de arriba abajo: tierra Peñalolén, Linares, Pomaire.
Columna de izquierda a derecha: arena fina 1:1, arena fina 1:2, arena gruesa 1:1, arena gruesa 1:2.
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS VARIACIÓN CON ARENA FINA

Tierra / Proporción	Altura de agua ascendida	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Cualidad (aparición fisuras)
Peñalolén 1 tierra : 1 arena	2,5 cm	264	283	7,2%	
Peñalolén 1 tierra : 2 arena	2,8 cm	267	293	6%	
Linares 1 tierra : 1 arena	0,5	246	255	3,7%	
Linares 1 tierra : 2 arena	0,7	247	257	4%	
Pomaire 1 tierra : 1 tierra	0,5	270	274	1,5%	
Pomaire 1 : 2 arena	0,6	308	312	1,3%	

Tabla 4. Resultados variación arena fina.

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS VARIACIÓN CON ARENA GRUESA

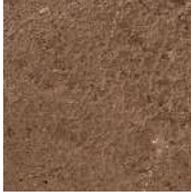
Tierra / Proporción	Altura de agua ascendida	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Cualidad (aparición fisuras)
Peñalolén 1 tierra : 1 arena	2,4	325	340	4,6%	
Peñalolén 1 tierra : 2 arena	1,9	313	324	3,5%	
Linares 1 tierra : 1 arena	1,3	315	323	2,5%	
Linares 1 tierra : 2 arena	0,8	318	323	1,6%	
Pomaire 1 tierra : 1 tierra	2,3	302	322	6,6%	
Pomaire 1 : 2 arena	1,4	321	328	2,2%	

Tabla 5. Resultados variación arena gruesa.

Fuente: Elaboración propia

SELECCIÓN DE PROPORCIÓN ÓPTIMA

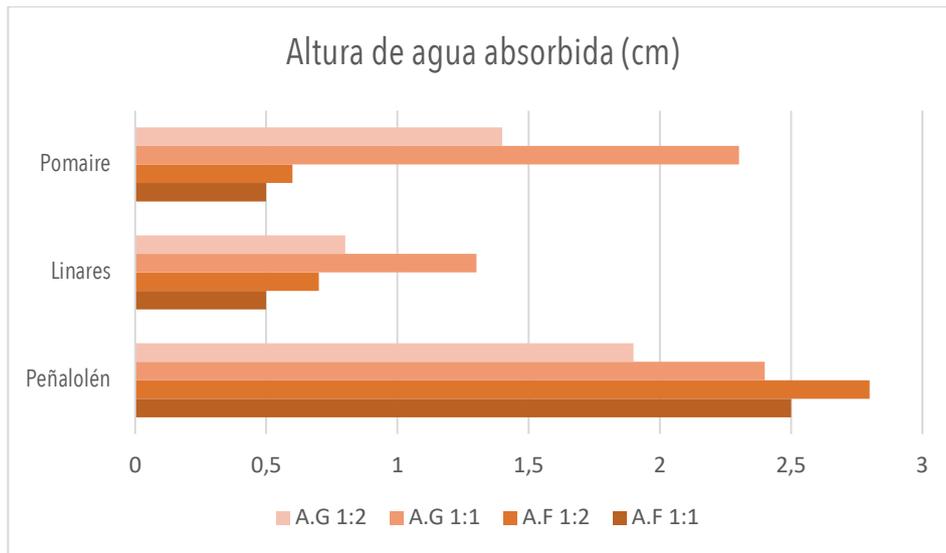


Figura 14. Altura de agua absorbida (cm).

Fuente: Elaboración propia

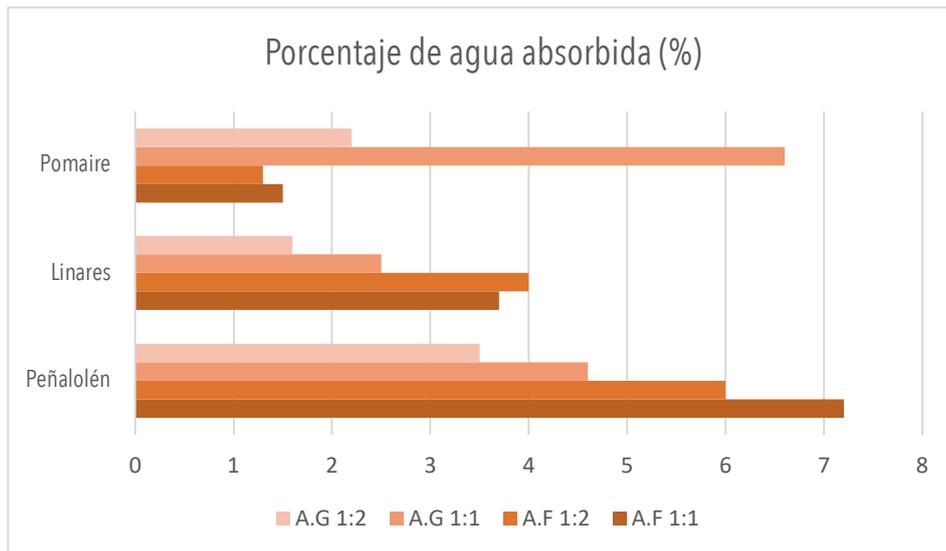


Figura 15. Porcentaje de agua absorbida (%).

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos se resumen en gráficos de barra para tener una mejor lectura. Como primera observación, es importante mencionar la diferencia de cómo responden los tipos de tierra ante las condiciones hídricas, obteniendo en Peñalolén una alta cantidad de agua absorbida en comparación a Linares y

Pomaire. También es posible observar que la tierra de Linares se mantiene más estable, teniendo menor oscilación entre las distintas variaciones de arena, no así en la de Pomaire, que si bien puede tener muy buenas respuestas ante la absorción hídrica, también puede tener respuestas desfavorables ante el contacto directo con agua.

Como se mencionó anteriormente, esta etapa tiene como objetivo encontrar la proporción de tierra y arena más óptima ante las condiciones hídricas, y para ello, se considerará seleccionar en cada tanda, una muestra en cada tierra según resultados obtenidos bajo un criterio de selección (tabla 6).

Tierra	Primera tanda: ARENA FINA	Segunda tanda: ARENA GRUESA
Peñalolén	1:2	1:2
Linares	1:1	1:2
Pomaire	1:2	1:2

Tabla 6. Selección de muestras / proporción óptima.

Fuente: Elaboración propia

6.4.3 ETAPA DOS: Aditivos ante ensayos hídricos

Esta etapa consiste en poner a prueba los estabilizadores elegidos (SIKALATEX y cáscara de huevo pulverizada/ESP) ante las distintas condiciones hídricas. Para ello también se harán muestras de tierra sin aditivos y así visualizar la comparativa.

Muestras: construcción de probetas de mortero 15x15. Número total: 18

Primera tanda: mezcla de tierra y arena fina

1. Mortero 15x15 cm sin aditivos (3 muestras, 1 por cada tierra)
2. Mortero 15x15 cm con SIKALATEX (3 muestras, 1 por cada tierra).
3. Mortero 15x15 cm con ESP (3 muestras, 1 por cada tierra).

Número total: 9

Segunda tanda: mezcla de tierra y arena gruesa

4. Mortero 15x15 cm sin aditivos (3 muestras, 1 por cada tierra).
5. Mortero 15x15 cm con SIKALATEX (3 muestras, 1 por cada tierra).
6. Mortero 15x15 cm con ESP (3 muestras, 1 por cada tierra).

Número total: 9



Figura 16. Proceso mezcla ESP. Se muele ESP en licuadora hasta obtener grano más fino. Se agrega a la mezcla de tierra y se revuelve.

Fuente: Elaboración propia.

I. Ensayo de absorción capilar

Objetivo: Comprobar cuál es el aditivo que mejor resiste ante la absorción de agua. Se dispondrán las muestras sobre un paño húmedo durante 1 hora.

Mediciones del ensayo: Altura de agua absorbida en centímetros y cantidad de agua absorbida en gramos. Mientras más alto y mayor es el peso final, mayor es la cantidad de agua absorbida y por lo tanto, menor es la resistencia al agua.

RESULTADOS

Primera tanda - arena fina

Tierra Peñalolén	Altura de agua ascendida (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Textura
Sin aditivos	1,4	756	783	3,6%	
SIKALATEX	2	818	868	6,1%	
ESP	1,1	778	811	4,2%	

Tabla 7. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena fina Peñalolén.

Fuente: Elaboración propia

Tierra Linares	Altura de agua ascendida (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Textura
Sin aditivos	1,9	742	790	6,5%	
SIKALATEX	1,7	776	802	3,4%	
ESP	1,2	843	868	3%	

Tabla 8. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena fina Linares.

Fuente: Elaboración propia

Tierra Pomaire	Altura de agua ascendida	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso	Textura
Sin aditivos	1,6	788	815	3,4%	
SIKALATEX	1,4	630	659	4,6%	
ESP	1,3	876	901	2,9%	

Tabla 9. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena fina Pomaire.

Fuente: Elaboración propia

Segunda tanda-arena gruesa

Tierra Peñalolén	Altura de agua ascendida (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	TEXTURA
Sin aditivos	2	1079	1118	3,6%	
SIKALATEX	2	1068	1104	3,4%	
ESP	1,6	1035	1063	2,7%	

*Tabla 10. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena gruesa Peñalolén.
Fuente: Elaboración propia*

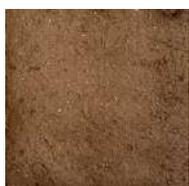
Tierra Linares	Altura de agua ascendida (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Textura
Sin aditivos	1	1022	1046	2,3%	
SIKALATEX	1	1051	1070	1,8%	
ESP	0,7	1143	1154	1%	

Tabla 11. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena gruesa Linares.

Fuente: Elaboración propia

Tierra Pomaire	Altura de agua ascendida (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Textura
Sin aditivos	1,6	1005	1018	1,3%	
SIKALATEX	1,4	1009	1026	1,7%	
ESP	0,9	1038	1053	1,4%	

Tabla 12. Resultados ensayo de ascensión capilar en arena gruesa Pomaire.

Fuente: Elaboración propia

OBSERVACIONES

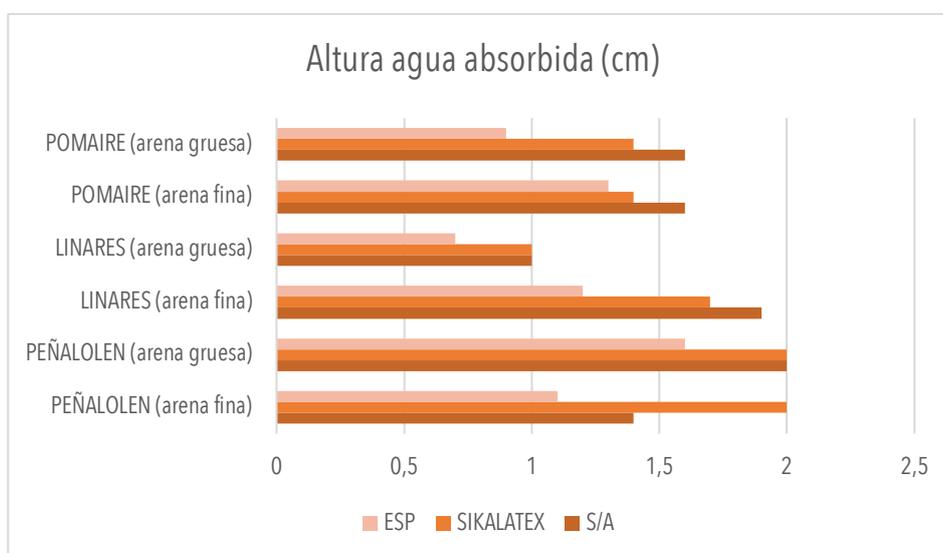


Figura 17. Altura de agua absorbida (cm).

Fuente: Elaboración propia

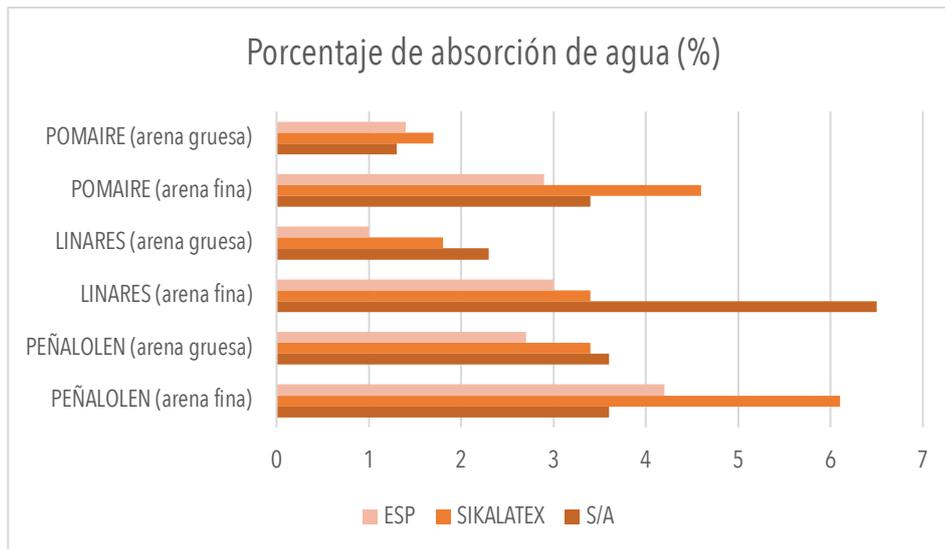


Figura 18. Porcentaje de absorción de agua (%).

Fuente: Elaboración propia

De ambos gráficos (figura 17 y 18) es posible observar la eficiencia de las muestras con el aditivo de ESP, obteniendo la altura y el porcentaje más bajo en cada una de las categorías, sobre todo utilizando una tierra arcillosa estabilizado con arena gruesa, ya que los valores demuestran una ínfima variación de peso. Por otro lado, el uso de SIKALATEX en ciertos casos ha sido capaz de disminuir los valores de absorción, pero no de una manera notoria. De hecho, es posible obtener resultados más deficientes que en las muestras sin aditivos, en el caso de Pomaire y Peñalolén estabilizado con arena fina.

II. Ensayo de goteo

Las muestras se disponen en un ángulo de 45 grados respecto al apoyo vertical. A una altura de 30 cm se sitúa un regulador de goteo de uso médico para bajada de suero y se regula la salida del agua de manera que haya una gota por segundo. La cantidad de agua se determina a partir del mes más lluvioso en Valdivia (junio) con un total de 190 mm aproximadamente. Como se mencionó antes, de

los 30 días de junio, en 22 llueve, por lo que se calculará un promedio diario de precipitaciones para así poder proporcionarlo a la muestra de tamaño 15 x 15 cm. De esta forma se obtendrán los minutos de duración del ensayo en función de la cantidad de agua caída por segundo.



Figura 19. Montaje para ensayo de goteo.

Fuente: Elaboración propia

Para ello se efectúa el siguiente cálculo:

$$\begin{aligned} 190 \text{ mm} / 22 \text{ días} &= 8,6 \text{ mm diarios} = 8,6 \text{ L/m}^2 \\ \text{Y considerando que una gota por segundo son } 500 \text{ cm}^3/\text{hora}, \\ 500 \text{ cm}^3/\text{hora} &= 0,5 \text{ L/hora} \\ 8,6 \text{ L/m}^2 : 0,5 \text{ L/hora} &= 17,2 \text{ horas/m}^2 \\ \text{Utilizando muestras de } 15 \times 15 \text{ cm, la equivalencia de horas al área a estudiar (400 cm}^2) \text{ es:} \\ 17,2 \text{ horas/m}^2 \times 0,0225 \text{ m}^2 &= 0,39 \text{ horas} = \mathbf{23 \text{ minutos (duración del ensayo)}} \end{aligned}$$

Objetivo: Determinar la resistencia del material ante una incidencia de agua constante.

Mediciones del ensayo: Observación de deformaciones en las muestras.



Figura 20. Baja de suero con regulador de goteo utilizado en ensayo.
Fuente: Elaboración propia

Observaciones del proceso: Si bien el objetivo del ensayo fue lograr 1 gota por segundo durante 23 minutos, no fue posible efectuarlo debido a que la presión en el regulador de goteo era inconstante. De esta forma se vio necesario inyectar aire y así generar la presión necesaria para la salida de agua.

Esto generó una caída de agua discontinua, en el que se podía ver un goteo rápido en un inicio pero luego iba descendiendo. De esta manera, el formato de ensayo cambia desde goteo por segundo a cantidad de agua caída, el cual es 100 mL por muestra. Así, la rapidez del goteo no influye en los resultados sino que solo el volumen de agua.

RESULTADOS

Tierra Peñalolén	ARENA FINA		ARENA GRUESA	
	Estado original	Resultado goteo	Estado original	Resultado goteo
Sin aditivos				
SIKALATEX (1:15 partes de agua utilizada)				
ESP (1:7 partes de mezcla de tierra)				

Tabla 13. Resultados ensayo de goteo Peñalolén.
Fuente: Elaboración propia

Tierra Linares	ARENA FINA		ARENA GRUESA	
	Estado original	Resultado goteo	Estado original	Resultado goteo
Sin aditivos				
SIKALATEX (1:15 partes de agua utilizada)				
ESP (1:7 partes de mezcla de tierra)				

Tabla 14. Resultados ensayo de goteo Linares.
Fuente: Elaboración propia

Tierra Pomaire	ARENA FINA		ARENA GRUESA	
	Estado original	Resultado goteo	Estado original	Resultado goteo
Sin aditivos				
SIKALATEX (1:15 partes de agua utilizada)				
ESP (1:7 partes de mezcla de tierra)				

Tabla 15. Resultados ensayo de goteo Pomaire.
Fuente: Elaboración propia

OBSERVACIONES

Ante los resultados obtenidos en el ensayo de goteo, es posible destacar la respuesta de la tierra cuando se estabiliza con arena fina en comparación a la arena gruesa, teniendo este último mejor resistencia a la erosión hídrica, tal como menciona Minke en el ensayo de distribución granulométrica frente a la erosión hídrica (figura 2).

Respecto a los aditivos impermeabilizantes, se considera que el SIKALATEX puede disminuir los efectos hídricos, erosionando con menor profundidad (en comparación a la muestra sin aditivos) en los tres tipos de tierra. Sin embargo, no deja de ser importante que aún existen daños relevantes en las muestras.

Por el contrario, las muestras con ESP (cáscara de huevo pulverizada) en una proporción del 15% de la mezcla total, obtienen muy buenos resultados provocando una ínfima erosión en los tres tipos de tierra, permaneciendo invariante al antes y después del goteo.

6.4.4 ETAPA TRES: Búsqueda en la viabilidad de la utilización de ESP

Ante los buenos resultados obtenidos en la utilización de cáscara de huevo en ensayos hídricos, teniendo un bajo porcentaje de absorción de agua y mayor resistencia a su erosión, se decide indagar sobre este material para hacer viable su uso en el campo arquitectónico y constructivo.

Para las muestras anteriores se utilizó un 15% de ESP, es decir aproximadamente 1/7 de la parte total de la mezcla de tierra. Esto, si se lleva a la realidad, significa una gran cantidad de cáscara de huevos a utilizar en una obra, ya sea de gran o pequeña escala. Es por ello que para hacer un uso del material de manera eficaz, en una primera instancia se pondrá a prueba su efectividad con una menor cantidad, disminuyendo su proporción en 5% y 10%. Posteriormente se probará su uso solo en el recubrimiento, es decir, en los revoques y ver hasta qué capa resiste al agua.

Fase I. Disminución de proporción de ESP en la mezcla.

Luego de haber obtenido resultados exitosos con un 15% de ESP en la mezcla de tierra, se elaboran muestras disminuyendo su porcentaje con un 5% y 10% de ESP. De esta forma se comprobará la eficiencia de la cáscara de huevo buscando un límite mínimo de proporción en el material. Para ello se pondrá a prueba mediante los dos ensayos que se han desarrollado a lo largo de la investigación, estos son, el ensayo de absorción capilar y el ensayo de goteo. Las muestras se fabrican con la tierra de Peñalolén ya que fue la que presentó más deficiencia ante la erosión hídrica. Así, se visualizará de mejor forma (siendo posiblemente más drásticos los resultados) hasta qué punto el ESP puede ser eficiente ante las condiciones menos óptimas del material tierra.

ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

Tierra Peñalolén + ESP (%)	Altura de agua ascendida (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (absorción) (g)	Aumento del peso inicial (%)	Textura
5%	1,4	1096	1113	1,6%	
10%	1,5	1109	1129	1,8%	
15%	1,5	1046	1066	1,9%	

Tabla 16. Resultados ensayos de absorción capilar en muestras con variaciones de ESP.

Fuente: Elaboración propia.

ENSAYO DE GOTEO

Tierra Peñalolén + ESP (%)	15%	10%	5%
			

Tabla 17. Resultado ensayo de goteo en muestras con variaciones de ESP.

Fuente: Elaboración propia.

OBSERVACIONES

Considerando el ensayo de goteo previo realizado en etapa dos, en el que no hubo erosión del material, y por lo tanto, luego de su secado no se vieron diferencias entre el antes y después, se decide analizar los resultados inmediatamente después de terminar el ensayo. De esta manera, se ve con mayor facilidad el humedecimiento de la muestra. Así, es posible apreciar que la

muestra con ESP en un 10% obtiene resultados similares respecto al del 15%, obteniendo casi la misma altura de ascensión capilar, porcentaje de absorción hídrica y expansión del humedecimiento en la muestra. En la muestra con un 5% de ESP, se puede observar que la muestra se humedece casi en su totalidad.

Sin embargo, es importante mencionar que aún así los daños en ellas son ínfimos, obteniendo una leve erosión en las tres muestras.

En esta fase se considera que la adición de ESP en un 10% de la totalidad de la mezcla de tierra es la proporción mínima óptima para efectos de impermeabilización.

Fase II. Utilización en revoques

Se realizará muestra de tierra de 15x15 como base para posteriormente añadir 3 capas de revoque adicionando el estabilizante ESP (con las proporciones definidas en la fase I que es de 10% de la totalidad de la mezcla de tierra).

Estas capas son:

1. Capa gruesa de repellado tierra + paja (proporción 1:1) + 10% ESP. 2.5 - 4 cm de espesor.
2. Capa fina tierra + arena gruesa y fina + 10% ESP. 1 cm de espesor.
3. Capa tierra + arena fina + 10% ESP. 2 - 4 mm de espesor

Se llevarán a **ensayo de goteo** y luego se cortará la muestra a la mitad para observar hasta qué capa penetra el agua.



Figura 21. Proceso de elaboración de revoque.
Fuente: Elaboración propia

Proceso

Para elaborar la muestra de revoque, al igual que en la Fase I, se selecciona la tierra de Peñalolén ya que es la más desfavorable en cuanto a resistencia hídrica. De esta manera se observará la respuesta de la cáscara de huevo en las condiciones mínimas.

La paja a utilizar para el rellado, se muele para conseguir una textura más fina, ya que en la obra constructiva, esta capa generalmente es más elaborada. Una vez hecha la mezcla con tierra y ESP, se monta sobre una base de tierra sin aditivos de Peñalolén y se aplana hasta tener 3 cm de espesor. Se deja secar durante 24 horas y se prosigue con la segunda capa de tierra + arena gruesa y fina + ESP. Esta vez la capa es más delgada con 1 cm de espesor, por lo que el tiempo de secado se acorta a 5 horas y se finaliza

con la tercera capa más delgada de arena fina + tierra + ESP. La muestra se deja secar durante 24 horas adicionales. La muestra resultante se puede observar en la figura 22.



Figura 22. Muestra con 3 capas de revoque.

Fuente: Elaboración propia

OBSERVACIONES

Una vez realizado el ensayo de goteo, con un volumen total de 100 mL para la caída de agua. Se corta la muestra a la mitad para visualizar hasta qué capa de revoque el agua se filtró.



Figura 23. Muestra resultante luego de ensayo de goteo, cortado a la mitad.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura 23 que la base y la primera capa correspondiente a tierra + paja + ESP se mantiene intacto. Sin embargo en las siguientes capas 2 y 3, se visualiza su humedecimiento. Aún así, se mantienen resistentes ante la erosión del goteo.

En esta fase es posible concluir que la utilización de ESP en una proporción del 10% en la capa 2 y 3 (las dos más externas) responde positivamente ante condiciones hídricas, manteniendo la base y la capa de repellado gruesa aisladas del humedecimiento del goteo.

CAPITULO 05: Conclusiones

A lo largo de la investigación, se elabora el análisis de la composición granulométrica de la tierra para efectos de impermeabilización así también como la estabilización con diferentes tipos de arena y aditivos, con el objetivo que evaluar posibles relaciones a través de la puesta a prueba en ensayos de laboratorio.

Siendo uno de los objetivos a desarrollar la comprobación del estudio de Gernot Minke sobre la distribución granulométrica ante la erosión hídrica, fue necesario recurrir a diversos ensayos de laboratorio para lograr definir cuál es el porcentaje de arcilla que se puede encontrar en la tierra y si es posible encontrar el 30% en alguna de ellas. Sin embargo, durante el proceso de la investigación se encontraron ciertas dificultades que imposibilitaban la búsqueda detallada de limo y arcilla, ya que ambos poseen un grano muy fino y similar entre ellos. A pesar de ello, sí se pudo caracterizar la tierra definiendo un porcentaje de plasticidad, el cual se traduce en qué tan arcillosa o limosa es la tierra. Respecto a esta evaluación, la teoría que se define en la investigación sobre la distribución granulométrica de Minke, se traduce en solo una aproximación o acercamiento para mejorar la resistencia hídrica. Ante ello, se abren nuevas preguntas, como por ejemplo, si ese 30% de arcilla en realidad se refiere a una tierra de tipo arcillosa con un 70% de arena adicional en complemento, o si el 30% de arcilla corresponde a la fracción de tierra tamizada correspondiente a mezcla de arcilla y limo.

En definitiva, en este ámbito se comprueba que la tierra es un material no estandarizado y que cada una se trabaja de una manera distinta mediante ensayo y error, por lo que el objetivo de la investigación de lograr una composición granulométrica "estándar" se ve imposibilitado. De esta manera, el desarrollo de la investigación fue cambiando de acuerdo a las conclusiones de cada etapa, y en ese sentido, se vio oportuno ver las respuestas del material de los distintos tipos

de suelo (Peñalolén, Linares y Pomaire) ante las condiciones hídricas y analizar cómo se relaciona con las distintas variaciones de arena y aditivos.

Respecto a los resultados obtenidos en los ensayos hídricos, se comprueba que la tierra arcillosa estabilizada con arena gruesa funciona de mejor forma ante la erosión hídrica, obteniendo menos fisuras y perforaciones, tal como menciona Minke en su ensayo de distribución granulométrica. Sin embargo, en complemento con tierra muy arcillosa como la de Pomaire, puede tener efectos negativos cuando hay contacto continuo con agua (dado los resultados en ensayo de ascensión capilar). Aún así, esto último se ve como un punto no tan relevante ya que en las construcciones de tierra es muy difícil ver que un elemento esté en contacto con agua durante mucho tiempo. En base a ello, se considera más importante la respuesta de la erosión hídrica.

En cuanto a aditivos se refiere, la cáscara de huevo pulverizada o ESP ha entregado resultados positivos en ambos ensayos hídricos, encontrando una mínima variación en la absorción de agua así también como en la erosión del goteo continuo, permaneciendo sin perforaciones o fisuras. Sin embargo, para utilizarlo a escala real, se vio importante considerar su uso en cantidades menores, desarrollo que se llevó a cabo en la etapa tres. De esta manera, el porcentaje de referencia de la investigación de Olaya Bulla (2018) en el que se concluyó que con un 15% se lograban buenos resultados, se logró bajar a un 10% teniendo efectos similares.

Respecto a los resultados de la fase II en la etapa 3, correspondiente al uso de ESP en las distintas capas de revoque con el objetivo de ver hasta qué capa penetra el agua luego del ensayo de goteo, se pudo concluir que la utilización de la cáscara de huevo en las dos capas externas entrega buenas respuestas para la protección de muros de tierra. Esto permitiría reducir el uso de ESP a un total menor a 1.5 cm

de espesor, por lo que la puesta en práctica de este material en la obra constructiva podría ser ejecutable.

Considerando la actual situación en la cual los procesos constructivos se enfocan en la extracción y producción de productos que generan contaminación, es importante tomar en cuenta el uso de materiales sustentables, que además, generen una disminución en sus desechos. Es por ello, que la utilización de cáscara de huevo en el campo constructivo y arquitectónico podría ser un producto potencial y oportuno de utilizar en zonas pluviométricas extremas, generando resultados más eficientes que con los productos químicos, como el SIKALATEX, que luego de su puesta a prueba, se ha podido concluir que su uso no responde eficazmente a estas condiciones hídricas extremas.

Finalmente, la investigación podría quedar abierta a la búsqueda de los elementos químicos de la cáscara de huevo para ver qué es lo que lo hace tan efectivo a la resistencia hídrica. Si bien se reconoce que existe un gran contenido de Calcio, es sugerente considerar otros compuestos que lo complementan.

CAPITULO 6: REFERENCIAS

- Ministerio de Obras Públicas. (2008). *Manual de Carreteras. Volumen N°8. Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control.*
- Yuste, B. (2016). *Arquitectura de tierra. Caracterización de los tipos edificatorios.*
- Minke, G. (1994). *Manual de construcción en tierra.* Kassel: Fin de Siglo.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y Construcción en tierra. Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en tierra.* Barcelona.
- Construcción con tierra en climas lluviosos: desarrollos del período colonial e independiente en las cuencas de los ríos Paraguay, P. y. (2017).
Obtenido de Anales del IAA:
http://www.iaa.fadu.uba.ar/ojs/index.php/anales/article/view/266/html_208
- Castilla Pascual, F. J. (2004). *Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra. Volumen I.* Madrid.
- DiarioDeValdivia.* (18 de agosto de 2021). Obtenido de Cambio climático y déficit de lluvias: Valdivia mantiene su status de "Valdilluvia":
<https://www.diariofutro.cl/noticia/actualidad/2021/08/cambio-climatico-y->
- Olaya Bulla, A. P. (2018). *Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías.* . Santander.
- Bozzano Ciavaglia, B. (2017). *Acabados y revestimientos en el diseño de arquitectura de tierra.* Montevideo.
- Ibañez, J. J. (14 de mayo de 2008). *Los Suelos de Chile: Factores Formadores e Introducción a su Tipología y Clasificación.* Obtenido de
<https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/05/24/92761>
- Red Iberoamericana Proterra. (2009). *Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra. Prácticas de campo.*
- Ministerio de Obras Públicas. Dirección de vialidad. (2008). *Manual de Carreteras. Volumen N°8. Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control.* Obtenido de
<https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/VOL8MAR2008EST.pdf>
- Laboratorio Nacional de Vialidad. (2021). *Curso Laboratorista Vial. Volumen III. Geotecnia.*
- Weather Atlas. (s.f.). Previsión meteorológica y clima mensual Valdivia, Chile.*
Obtenido de Weather Atlas: <https://www.weather-atlas.com/es/chile/valdivia-clima>
- Weather Spark. (s.f.). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Valdivia.*
Obtenido de Weather Spark:
<https://es.weatherspark.com/y/24136/Clima-promedio-en-Valdivia-Chile-durante-todo-el-año>

OTRO. (13 de abril de 2016). François Cointeraux. Obtenido de OTRO. Otro blog de arquitectura y otras cosas.:

<http://otrootroblog.blogspot.com/2016/04/francois-cointeraux.html>

Pierres & Terres. (s.f.). Le Domaine de la Terre. Obtenido de Pierres & Terres:

<https://pierres-et-terres.org/patrimoines-villards/les-fougeres/le-domaine-de-la-terre/>

5.1 Método para determinar el límite líquido

8.102.3 SUELOS: METODO PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO (LNV 89)*

1.- Alcances y Campo de Aplicación. Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

* El Método 8.102.3 (LNV 89) es una adaptación de la Norma NCh 1517 / I - 79.

2.- Referencias. Método 8.102.2 Suelos: Método para determinar el contenido de humedad.

3.- Terminología.

Límite Líquido. Humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluyan y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

4.- Aparatos.

4.1 Plato de Evaporación. Debe ser de porcelana, acero inoxidable, bronce o aluminio, con un diámetro de aproximadamente 120 mm.

4.2 Espátula. Debe contar con una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.

4.3 Aparato de Límite Líquido (Máquina Casagrande). Taza de bronce con una masa de 200 ± 20 g, montada en un dispositivo de apoyo fijado a una base de plástico duro de una resiliencia tal que una bolita de acero de 8 mm de diámetro, dejada caer libremente desde una altura de 25 cm, rebote entre un 75 y un 90%, (Lámina 8.102.3 A).

4.4 Acanalador. Combinación de acanalador y calibre, construido de acuerdo con el plano y dimensiones de la figura de la Lámina 8.102.3 B.

4.5 Cápsulas para Secado. Debe ser de aluminio, bronce o acero inoxidable.

4.6 Balanza. La balanza debe tener una resolución de 0,01 g.

4.7 Probeta Graduada. La probeta debe tener una capacidad mínima de 25 ml.

4.8 Horno. Provisto de circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantener la temperatura a $60 \pm 5^\circ\text{C}$.

Nota 1: No se debe ocupar la superficie inferior del horno para el secado de muestras, pues ésta se encuentra siempre a una temperatura superior a la fijada.

Nota 2: Se recomienda para una mayor velocidad de secado el uso de hornos con convección forzada.

5.- Ajuste y Control del Aparato de Límite Líquido.

5.1 Ajuste de la Altura de Caída de la Taza. Gire la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adosado al ranurador), verifique que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente de 10 mm. De ser necesario, afloje los tornillos de fijación y mueva el de ajuste hasta obtener la altura de caída requerida. Si el ajuste es correcto se escuchará un ligero campanilleo producido por la leva al golpear el tope de la taza; si la taza se levanta por sobre el calibre o no se escucha ningún sonido, realice un nuevo ajuste.

5.2 Verificaciones Adicionales.

- a) No debe producirse juego lateral por desgaste entre la taza y el pasador que la sostiene.
- b) Los tornillos que conectan la taza con el apoyo deben estar apretados.
- c) El desgaste de la taza no debe sobrepasar la tolerancia de masa especificada en 4.3.
- d) El diámetro de la huella del punto de percusión en la base no debe exceder 15 mm. Cuando esto ocurra, pula la base, verificando que se mantiene la resiliencia especificada en 4.3.
- e) El desgaste del ranurador no debe sobrepasar las tolerancias dimensionales especificadas en la figura de la Lámina 8.102.3 B.

5.3 Antes de cada ensaye verifique que la base y la taza estén limpias y secas.

6.- Preparación de la Muestra de Ensaye.

6.1 Extraiga por cuarteo una muestra representativa de un tamaño tal que asegure una masa mínima de ensaye de 500 g de material bajo tamiz 0,5 mm (N° 40).

6.2 Desmenuce los terrones con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

6.3 Seque la muestra al aire o en horno a una temperatura que no exceda de 60°C.

6.4 Distribuya de la siguiente forma la masa mínima de ensaye obtenida en 6.1:

- Límite Líquido	160 g
- Límite Plástico	40 g
- Límite de Contracción	100 g
- Ensayes de control	200 g

7.- Acondicionamiento de la Muestra.

7.1 Coloque la muestra en el plato de evaporación; agregue agua destilada y mezcle completamente mediante la espátula. Continúe la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua destilada necesarios para asegurar una mezcla homogénea.

7.2 Cure la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente. El tiempo de curado de las muestras depende del grado de plasticidad del suelo, para lo cual existe la siguiente clasificación:

- Suelos de alta plasticidad: ≥ 24 h
- Suelos de plasticidad media: ≥ 12 h
- Suelos de baja plasticidad: ≥ 1 h

8.- Procedimiento de Ensaye.

8.1 Coloque el aparato de límite líquido sobre una base firme.

8.2 Coloque en la taza una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula; la masa de suelo deberá colocarse centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base.

8.3 Moldee la masa de suelo con la espátula hasta obtener la forma indicada en la figura de la Lámina 8.102.3 B, evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.

8.4 Enrase y nivele a 10 mm en el punto de máximo espesor.

8.5 Reincorpore el material excedente al plato de evaporación.

8.6 Divida la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. Pase el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza; en ningún caso debe existir desprendimiento de la pasta del fondo de la taza; si ello ocurre, retire todo el material y reinicie el procedimiento. La formación de la ranura se debe lograr con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada.

8.7 Gire la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm.; si el cierre de la ranura es irregular, descarte el resultado. Registre el número de golpes obtenido (N).

8.8 Retire aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo del surco; colóquelo en una cápsula de secado y determine su humedad (w), de acuerdo con el Método 8.102.2.

8.9 Transfiera el material que quedó en la taza al plato de evaporación; lave y seque la taza y el ranurador.

8.10 Continúe batiendo con la espátula la pasta de suelo que quedó en el plato de evaporación para obtener un secado homogéneo. Repita las operaciones precedentes desde 8.3 en adelante, para dar origen a un nuevo punto.

Nota 3: El ensaye se debe realizar desde la condición más húmeda a la más seca; en ningún caso se debe rehumedecer la pasta de suelo.

8.11 El ensaye requiere de al menos cinco puntos para el trazado de la curva de fluidez.

Nota 4: Se recomienda que los puntos seleccionados se encuentren en el rango de 10 a 45 golpes.

9.- Expresión de Resultados.

9.1 Calcule y registre la humedad de cada determinación (w), de acuerdo con el Método 8.102.2.

9.2 Construya un gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica.

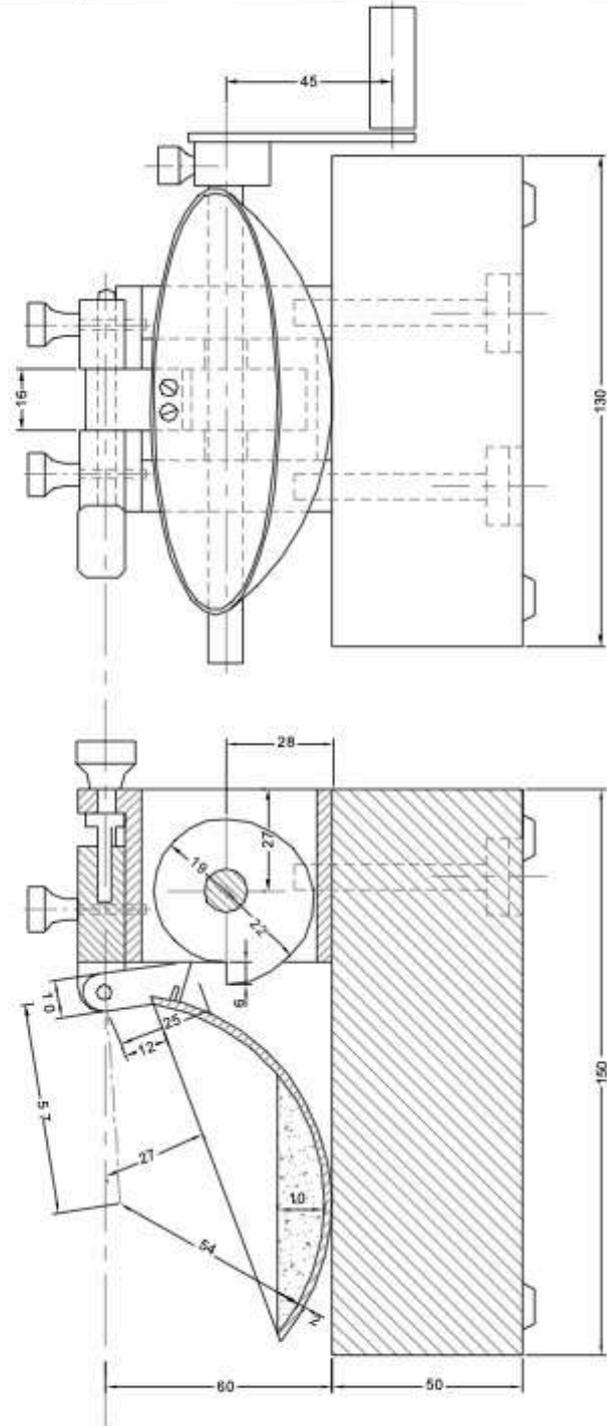
9.3 Dibuje los puntos correspondientes a los resultados de cada una de las cinco (o más) determinaciones efectuadas y construya una recta (curva de fluidez) que pase tan aproximadamente como sea posible por los puntos.

9.4 Expresar el Límite Líquido (LL) del suelo como la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

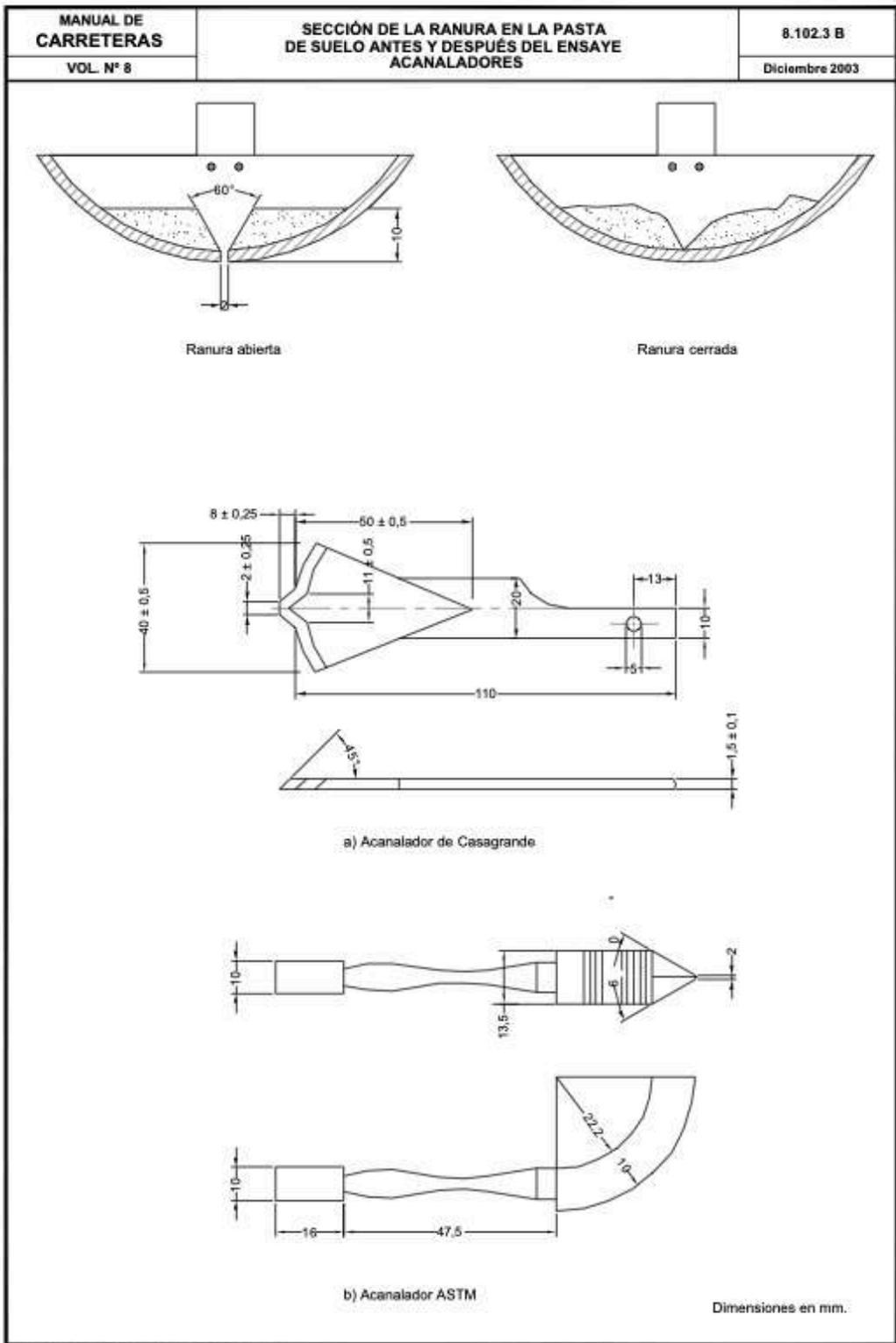
Nota 5: En el Método 8.102.4 se incluye un formato tipo de ficha de ensaye de Límites de Atterberg, en el cual se registrarán los resultados obtenidos en las determinaciones de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad.

10. Informe. El informe debe incluir lo siguiente:

- a) Valor del Límite Líquido.
- b) Cualquier información específica relativa al ensaye o al suelo en estudio.
- c) La referencia a este método.



Nota : Diseño desarrollado en la Universidad de Harvard por Casagrande.



5.2 Método para determinar el límite plástico

8.102.4 SUELOS: METODO PARA DETERMINAR EL LIMITE PLASTICO (LNV 90)

1.- **Alcances y Campo de Aplicación.** Este método establece el procedimiento para determinar el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos.

2.- Referencias.

- Norma NCh 1517/ II-78 Determinación del Límite Plástico de los Suelos.
- Método 8.102.2 Suelos: método para determinar el contenido de humedad.

3.- Terminología.

Límite Plástico. Humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

4.- Aparatos.

4.1 **Plato de Evaporación.** Debe ser de porcelana, acero inoxidable, bronce o aluminio, con un diámetro de 120 mm aproximadamente.

4.2 **Espátula.** Debe tener una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.

4.3 **Superficie de Amasado.** Placa de vidrio esmerilado de 20 x 20 cm.

4.4 **Cápsulas para Secado.** Deben ser de aluminio, bronce o acero inoxidable.

4.5 **Balanza.** Debe tener una resolución de 0,01 g.

4.6 **Probeta Graduada.** Debe tener una capacidad mínima de 25 ml.

4.7 **Patrón de Comparación.** Alambre o plástico de 3 mm de diámetro.

4.8 **Horno.** Debe tener circulación de aire y temperatura regulable, capaz de mantener una temperatura de 60 ± 5 °C.

5.- Preparación de la Muestra de Ensaye.

5.1 Extraiga, por cuarteo, una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensaye de 500 g de material bajo tamiz 0,5 mm (N° 40).

5.2 Desmenuce los terrones con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

5.3 Seque la muestra al aire o en horno a una temperatura que no exceda de 60°C.

5.4 La masa mínima de ensaye, obtenida según 5.1, debe distribuirse como sigue:

- | | |
|-------------------------|-------|
| - Límite Líquido | 160 g |
| - Límite Plástico | 40 g |
| - Límite de Contracción | 100 g |
| - Ensayes de Control | 200 g |

6.- Acondicionamiento de la Muestra de Ensaye.

6.1 Coloque la muestra en el plato de evaporación; agregue agua destilada y mezcle completamente mediante la espátula. Continúe la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua destilada necesarios para asegurar una mezcla homogénea.

6.2 Cure la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente. El tiempo de curado de las muestras depende del grado de plasticidad del suelo, existiendo la siguiente clasificación:

- Suelos de alta plasticidad: ≥ 24 h
- Suelos de plasticidad media: ≥ 12 h
- Suelos de baja plasticidad: ≥ 1 h

6.3 Una vez curado el material, reduzca la humedad si es necesario mediante revoltura con la espátula, hasta que la pasta se vuelva suficientemente plástica para moldearla como una esfera.

7.- Procedimiento de Ensaye.

7.1 Tome una porción de la muestra de ensaye acondicionada de aproximadamente 1 cm^3 .

7.2 Amase la muestra entre las manos; luego hágala rodar sobre la superficie de amasado, ejerciendo una leve presión con la palma de la mano hasta conformar un cilindro.

7.3 Cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente 3 mm, doble, amase nuevamente y vuelva a conformar el cilindro.

7.4 Repita la operación, manteniendo la velocidad y la presión de amasado, hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pueda ser reamasado ni reconstituido.

7.5 Reúna las fracciones del cilindro disgregado y colóquelas en una cápsula de secado, previamente tarada. Determine y registre la humedad (w) de acuerdo con el Método 8.102.2, aproximando a un decimal.

7.6 Repita las etapas 7.1 a la 7.5 con dos porciones más de la muestra de ensaye.

8.- Expresión de resultados.

8.1 Calcule el Límite Plástico (LP) como el promedio de las tres determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensaye, aproximando a un decimal. Las determinaciones no deben diferir entre sí en más de dos puntos; cuando no se cumpla esta condición, repita todo el ensaye.

8.2 Calcule el Índice de Plasticidad (IP) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

donde:

- IP: Índice de Plasticidad del suelo (%).
- LL: Límite Líquido del suelo (%).
- LP: Límite Plástico del suelo (%).

8.3 Cuando no pueda determinar uno de los dos límites (LL o LP), o la diferencia resulte negativa, informe el Índice de Plasticidad como NP (no plástico).

8.4 Calcule el Índice Líquido (IL) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IL = \frac{w - LP}{IP}$$

donde:

- IL : Índice Líquido del suelo.
- w : Humedad natural del suelo (%).
- LP : Límite Plástico del suelo (%).
- IP : Índice de Plasticidad del suelo (%).

8.5 Calcule el Índice de Consistencia (IC) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IC = \frac{LL - w}{IP}$$

donde:

- IC : Índice de Consistencia del suelo.
- LL : Límite Líquido del suelo (%).
- w : Humedad natural del suelo (%).
- IP : Índice de Plasticidad del suelo (%).

9.- Criterios de Aceptación de Resultados.

9.1 Repetibilidad. Dos resultados obtenidos por un mismo operador sobre la misma muestra, en el mismo laboratorio, usando los mismos aparatos y en días diferentes, se deben considerar dudosos si difieren en más de un 10% del promedio de ambos.

9.2 Reproducibilidad. Dos resultados obtenidos por operadores diferentes, en laboratorios diferentes, se considerarán dudosos si difieren en más de 18% de su promedio.

10.- Registro de Resultados. En la Lámina 8.102.4 A se presenta un formato tipo de ficha de ensaye para registrar los resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad.

11.- Informe. El informe deberá incluir al menos los siguientes antecedentes:

- a) Identificación del contrato.
- b) Procedencia de la muestra.
- c) Fecha y lugar de muestreo.
- d) Fecha de ensaye.
- e) Valores del Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad.
- f) Cualquier información adicional respecto al ensaye o al suelo en estudio.
- g) La referencia a este método.

CERTIFICADO DE ENSAYE N°

Identificación del contrato:

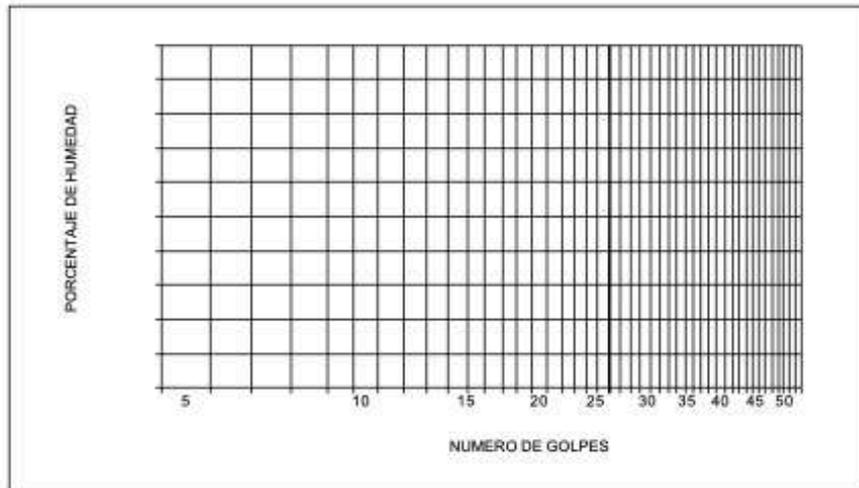
Identificación de la muestra:

Calicata / Sondaje: Horizonte: Fecha muestreo:

	LÍMITE PLÁSTICO			LÍMITE LÍQUIDO				
	1	2	3	1	2	3	4	5
ENSAYE N°								
CÁPSULA N°								
NÚMERO DE GOLPES								
1 PESO CÁPSULA + SUELO HUM. (g)								
2 PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)								
3 PESO DE LA CÁPSULA (g)								
4 PESO DEL AGUA (1-2) (g)								
5 PESO DEL SUELO SECO (2-3) (g)								
6 HUMEDAD (4/5)*100 (%)								
7 PROMEDIO LÍMITE PLÁSTICO (%)								

Llenar con bolígrafo o tinta

CURVA DE FLUIDEZ



Límite Líquido (LL) %	Límite Plástico (LP) %	Índice de Plasticidad (IP = LL - LP) %
-----------------------	------------------------	--

Muestreado por :

Ensayador :

Fecha :

V° B° :